

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Diseño e implementación de un sistema electrónico usando Arduino para el control de movimiento de una mano robótica impresa en 3D



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

Miriam Rubio Lecuona

Carlos Aristóteles De La Cruz Blas

Pamplona, 1 de Septiembre de 2017

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo de fin de grado es el estudio de diferentes formas de controlar electrónicamente los movimientos de una mano artificial. Para ello se realiza también un prototipo mecánico dotada de capacidad de movimiento.

Por un lado, se estudian las diferentes opciones que se podrían tener en cuenta al abordar el trabajo de realizar una mano robótica o protésica. Se discuten diferentes materiales que se podrían emplear, diferentes sistemas de actuación que podrían generar la potencia que impulse el movimiento de los dedos y diferentes sistemas de transmisión de este movimiento a los dedos.

Por otro lado, se ha realizado una mano robótica usando la técnica de impresión 3D. A este prototipo se le han adaptado los elementos necesarios para generar un modelo de control de movimiento: actuadores, sensores y transmisores de movimiento. La parte central del procesamiento de las señales electrónicas será a través de un microcontrolador Arduino.

Para este trabajo final de grado se han empleado diferentes herramientas de software. Las más empleadas son: Arduino, para la programación del microcontrolador y SketchUp, para la modificación de las piezas impresas en 3D del prototipo.

## ABSTRACT

The purpose of this final degree project is the study of different approaches to control the movements of an artificial hand, electronically. To this end, using a 3D printer, a mechanical prototype will be designed, fabricated and tested.

On the one hand, we study the different factors and options that are required to design a robotic or prosthetic hand are fully treated and discussed. Thus, this project deals with materials that could be used, actuation systems that drives the movement of the fingers and transmission.

On the other hand, a robotic hand will be designed and fabricated using the 3D printing technique. This prototype will be customized with the necessary elements to generate a model of motion control: actuators, sensors and motion transmitters. The core part of electrical signal processing will be carried out using an Arduino microcontroller.

Different software tools will be used for this final grade project. Such as Arduino, for the microcontroller programming, and SketchUp, for the modification of the prototype's pieces printed in 3D.

**PALABRAS CLAVE :** Arduino, mano, prótesis, robótica, impresión 3D.

**KEYWORDS :** Arduino, hand, prosthesis, robotic, 3D printing.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	1
PALABRAS CLAVE.....	1
KEYWORDS .....	1
ÍNDICE.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
ÍNDICE DE TABLAS .....	5
1 INTRODUCCIÓN .....	6
1.1 Motivación .....	6
1.1.1 Historia .....	7
1.1.2 Actualidad.....	8
1.1.3 Ámbitos de aplicación de las manos artificiales.....	8
1.2 Objetivo .....	9
1.3 Método.....	10
2 ESTADO DEL ARTE .....	11
2.1 Estado de arte de las diferentes formas de fabricar en 3D la mano.....	11
2.1.1 Material .....	11
2.1.2 Diseño.....	12
2.2 Sistemas de actuación y de transmisión .....	12
2.2.1 Sistema de actuación: Estudio de los posibles actuadores y sensores que pueden utilizarse para articular la mano.....	12
2.2.2 Sistema de transmisión: Diversos algoritmos para controlar la velocidad o posición de los dedos .....	20
2.3 Sistema de control.....	24
2.4 Componentes del prototipo.....	24
3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO .....	25
3.1 Definición del sistema .....	26
3.2 Componentes .....	28
3.2.1 Piezas.....	28
3.2.2 Mecanismo de la mano .....	29
3.2.3 Arduino UNO .....	30
3.2.4 Motor shield .....	31
3.2.5 Motor .....	34

---

3.2.6	Método de control de los motores .....	35
3.2.7	Resumen de componentes.....	37
4	Resultados experimentales .....	41
4.1.1	Primera prueba: Testeo de los motores.....	41
4.1.2	Segunda prueba: Control con una señal del encoder .....	42
4.1.3	Tercera prueba: Control con dos señales del encoder.....	43
4.1.4	Cuarta prueba: Control de los dedos .....	44
4.1.5	Quinta prueba: Ajuste de posición de los dedos.....	46
5	CONCLUSIONES .....	47
5.1	Metodología de diseño .....	47
5.2	Ventajas/Desventajas.....	48
5.3	Contextualización con la vida real.....	49
5.4	Puntos de mejora .....	49
6	BIBLIOGRAFÍA.....	51
7	ANEXOS .....	54
7.1	Resultados .....	54
7.1.1	Testeo de los motores.....	54
7.1.2	Control con una señal del encoder .....	59
7.1.3	Control con dos señales del encoder .....	60
7.1.4	Control de los dedos.....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.- Mano de alt-Ruppin construida con hierro en el año 1400 [32] .....	7
Fig. 2.- Primeras prótesis ortopédicas de Ambroise Paré [2] .....	7
Fig. 3.-La prótesis de mano incorpora una cámara para reconocer objetos[5] .....	8
Fig. 4.- Esquema de una de las clasificaciones de prótesis [8] .....	9
Fig. 5.- Clasificación de los principales actuadores para este tipo de proyectos [8] .....	13
Fig. 6.-Perspectiva explosionada de un pequeño motor de CD [33] .....	13
Fig. 7.- Micro motor plano de 1.5 a 3V DC [34] .....	14
Fig. 8.- Partes de un servomotor[13] .....	15
Fig. 9.- Servomotor de modelismo[13] .....	15
Fig. 10.- Motor DC sin escobillas [35] .....	16
Fig. 11.- Motor DC sin escobillas 28V [35] .....	16
Fig. 12.- Nitinol (ejemplo de SMA) [36] .....	16
Fig. 13.- Cilindros neumáticos [15] .....	17
Fig. 14.- Brazo robótico "Airic's arm" [17] .....	18
Fig. 15.- Resorte de torsión helicoidal [19] .....	21
Fig. 16.- Mecanismo de cuatro barras [3] .....	22
Fig. 17.- Dedo protésico con mecanismo hexacicloidal .....	22
Fig. 18.- Prototipo .....	24
Fig. 19.- Sistema completo .....	25
Fig. 20.- Diagrama de flujo .....	26
Fig. 21.- Otros componentes .....	28
Fig. 22.-Anatomía de la mano humana [37] .....	29
Fig. 23.- Dedo colocado .....	29
Fig. 24.- Placa Arduino UNO .....	30
Fig. 25.- Conexión ordenador-Arduino mediante cable USB tipo A/B [25] .....	31
Fig. 26.- Motor Shield v2.3 .....	31
Fig. 27.- Motor Shield, pines macho y conectores .....	33
Fig. 28.- Conexionado .....	33
Fig. 29.- Conexión completa de la mano .....	33

---

Fig. 30.- Motor DC empleado .....	34
Fig. 31.- Esquema dibujo del motor .....	35
Fig. 32.- Esquema pines codificador.....	35
Fig. 33.- Sensor de efecto Hall [31] .....	36
Fig. 34.- Interpretación de las señales del codificador [31] .....	36
Fig. 35.- Vistas de las piezas .....	39
Fig. 38.- Dedos motorizados enumerados .....	41
Fig. 39.- Gráfica resumen de la prueba .....	43
Fig. 40.- Señal obtenida del motor 1 (dedo 3).....	44
Fig. 41.- Fragmento de resultado .....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Características de los actuadores rotatorios[8] .....	19
Tabla 2.- Características de los actuadores lineales[8] .....	20
Tabla 3.- Características de los sistemas de transmisión[8] .....	23
Tabla 4.- Especificaciones técnicas Arduino UNO [10].....	31
Tabla 5.- Características motor .....	34
Tabla 6.- Detalles Piezas impresas 3D .....	37
Tabla 7.- Resumen de componentes electrónicos .....	40
Tabla 8.- Resumen de otros componentes .....	40
Tabla 9.- Relación sentido y giro de motores.....	42
Tabla 10.- Instrucciones de giro .....	46

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

Las manos son de las partes del cuerpo que más se utilizan a lo largo del día. Sirven como herramientas para manipular los objetos utilizados en el día a día. La manipulación principal consiste en agarrar y soltar. Luego, con movimientos más cuidados y precisos las manos son capaces de realizar incontables tareas. Además de estas características físicas las manos son también las encargadas de uno de los cinco sentidos, el tacto, que completa la función de las manos. Gracias al tacto se distinguen los objetos tocados.

A causa de accidentes o desde nacimiento existen muchas personas que tienen que aprender a vivir sin manos. Esto les impide interactuar con los objetos como el resto de personas. Para solventar este problema existen las prótesis de mano. Otra aplicación de este tipo de proyectos es la robótica.

En cualquier caso, para la realización de este tipo de proyectos hay que tener en consideración una serie de aspectos principales. Antes de adentrarse en la fabricación de una mano artificial hay que elegir: el material con el que se va a confeccionar, el sistema de actuación que va a generar el movimiento, el sistema de transmisión encargado de transferir el movimiento generado y el sistema de control que será necesario para que los anteriores sistemas mencionados funcionen.

Para realizar sensatamente esta elección es necesario tener en cuenta el tipo de uso que se le vaya a dar a la mano robótica a fabricar. En el caso del prototipo presentado en este trabajo la finalidad es didáctica, por lo tanto, no será tan importante, por ejemplo, la robustidad del resultado.

### 1.1.1 Historia

La necesidad del hombre de plantearse la elaboración de una mano artificial comenzó con la finalidad de suplir a la extremidad ausente. La primera prótesis de miembro superior registrada fue encontrada en una momia egipcia y data del año 2000 a.C. Con el paso de los años fueron apareciendo nuevas técnicas de fabricación de prótesis. La elaboración de las prótesis fue evolucionando en cuanto a los materiales empleados para ello, utilizándose madera, cueros, hierro, fibras sintéticas, polímeros, aleaciones de aluminio, etc.



Fig. 1.- Mano de alt-Ruppin construida con hierro en el año 1400 [32]

La primera mano registrada de hierro fue la mano del general romano *Marcus Sergius* que se fabricó en los años 218-202 a.C., durante la segunda guerra púnica. Estas pesadas pero resistentes manos evolucionaron en 1400 con la mano de *alt-Ruppin*, que se puede observar en la Fig.1. Esta mano de hierro contaba con un pulgar rígido en oposición y dedos flexibles que podían ser flexionados pasivamente y fijados, además, tenía la muñeca movable.[1]

Las prestaciones que las prótesis ofrecían siguieron evolucionaron con los años, pero no fue hasta el siglo XVI cuando el mecanismo se vio mejorado considerablemente, gracias al médico francés Ambroise Paré, quien introdujo el primer brazo artificial móvil a nivel de codo. “Le petite Loraine”, cómo bautizó a su creación, tenía unos dedos que podían abrirse o cerrarse presionando o traccionando y también se podía realizar el movimiento de flexión y extensión del brazo. En la Fig.2 se muestran algunas otras creaciones de Ambroise Paré.

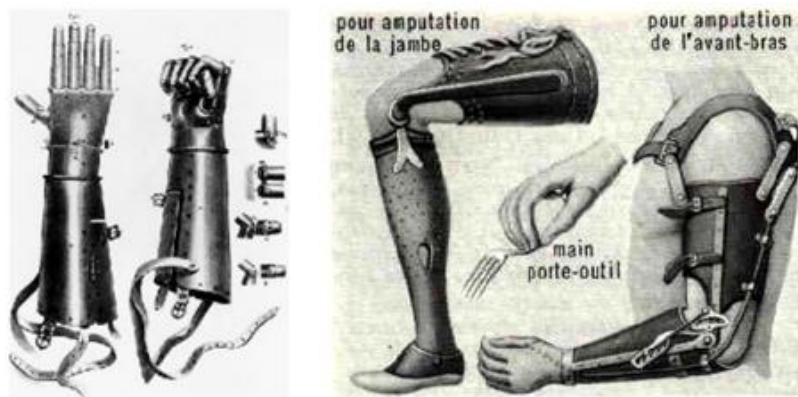


Fig. 2.- Primeras prótesis ortopédicas de Ambroise Paré [2]



A partir de 1946 se crearon sistemas de propulsión asistida, surgiendo así prótesis neumáticas y eléctricas. Más tarde, en Rusia de 1960, comenzaron a surgir las prótesis con control mioeléctrico. Esta tecnología consistía en aprovechar las pequeñas diferencias de potencial extraído durante la contracción de las masas musculares del muñón, conducir las y amplificarlas para obtener el movimiento [3].

### 1.1.2 Actualidad

Estos últimos años el sector de las prótesis ha avanzado mucho, gracias a la gran variedad de tecnologías disponibles. Por ejemplo, con las impresoras 3D existen infinidad de modelos de prótesis, mecánicas o eléctricas, disponibles para uso público.

Por otro lado, las manos robóticas, podría considerarse que su origen está en las máquinas autómatas. Aunque, por todas las cosas que tienen las manos robóticas y las prótesis en común, se puede asumir que la evolución ambas están relacionadas, siendo cada vez es más estrecha la relación entre ambas. Existe un nuevo modelo de mano artificial presentada en la revista *Journal of Neural Engineering* en mayo del 2017 por el investigador de la Universidad



*Fig. 3.-La prótesis de mano incorpora una cámara para reconocer objetos[5]*

de Newcastle Kianoush Nazarpour (*Fig.3*). Esta mano es capaz de coger información del entorno y utilizarla para acciones como alcanzar objetos de forma automática. Otro ejemplo de este tipo de prótesis robóticas es un nuevo estudio de la Universidad de Chicago que investiga cómo simular señales táctiles con la prótesis con una precisión de milisegundos [4]–[6].

### 1.1.3 Ámbitos de aplicación de las manos artificiales

Las manos artificiales son comúnmente empleadas en prótesis de manos y en manos robóticas. A continuación, se exponen las características principales de cada una de ellas y sus diferencias.

### 1.1.3.1 Prótesis de mano

Una prótesis es una extensión artificial que reemplaza una falange del cuerpo. En la Fig.4 se esboza el esquema de las clasificaciones de las prótesis. Pueden ser activas o pasivas. Estas últimas también se conocen como prótesis cosméticas, ya que la principal función que cumplen es estética y no tienen movimiento propio. Por otro lado, las prótesis activas son las que son accionadas por el cuerpo de quien las porta [7], [8].

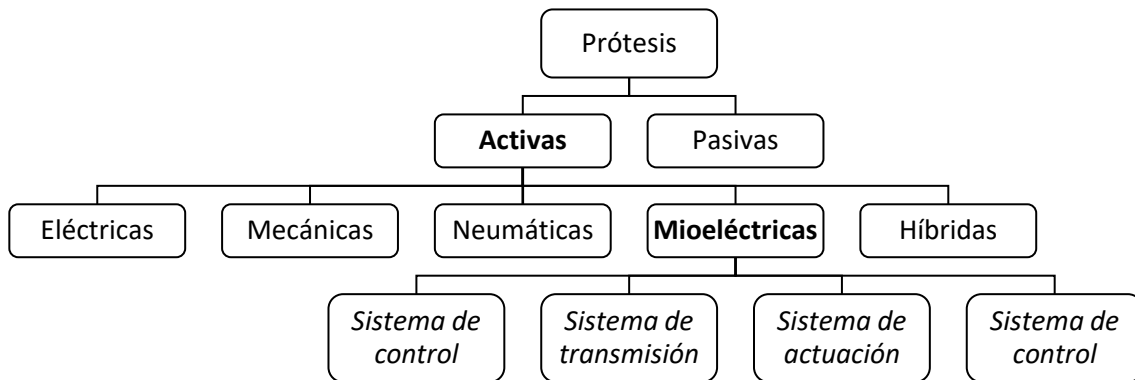


Fig. 4.- Esquema de una de las clasificaciones de prótesis [8]

### 1.1.3.2 Robótica

Cómo se menciona al final del [apart.1.1.1](#), las prótesis y las manos robóticas son muy parecidas en aspectos generales. La diferencia clave reside en cuál es la señal de entrada. En las manos robóticas puede estar impulsada por diversas fuentes de órdenes. Mientras que en las prótesis se entiende que es el portador quien debe generar la orden.

Además, en la robótica es más común que la prótesis tenga que enviar también información sobre el entorno desde los dedos. Pese a que en las prótesis se está estudiando la posibilidad de implementar la función del tacto, en cuyo caso debería haber una señal que fuera en dirección hasta el usuario.

## 1.2 Objetivo

Mediante este proyecto se pretende estudiar las diferentes maneras de diseñar una mano artificial. Más concretamente, las diferentes maneras de llevar a cabo los movimientos más básicos de una mano artificial. Para ello es necesario conocer diversas opciones de sistemas de control, actuación y transmisión. Además, se pretende poner en práctica algunas de las tecnologías estudiadas, para un primer contacto con lo que supone diseñar una mano robótica.

### 1.3 Método

El procedimiento llevado a cabo para la realización de este trabajo consiste en primero estudiar las opciones disponibles de:

- Elaboración de las piezas en 3D
- Sistemas de actuación y de transmisión
- Sistemas de control

Por otro lado, para este trabajo se realiza el desarrollo experimental de un prototipo de mano robótica. Para ello se ha fabricado el prototipo mecánico mediante la técnica de impresión en 3D.

Para generar el movimiento de los dedos se necesita de un sistema de actuación, para ellos se ha escogido un motor DC con codificador magnético para cada dedo. En cuanto al sistema de transmisión de movimiento se ha optado por un sistema de cuerdas. El microcontrolador Arduino UNO se encarga del procesado de las señales electrónicas obtenidas de los codificadores de cada motor y las señales encargadas de definir el movimiento del prototipo.

## 2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se realiza el estudio de las diferentes opciones que se pueden encontrar en el mercado para la realización de una mano artificial electrónicamente controlada. Como se explicaba en el capítulo anterior se va a hacer hincapié en la manufacturación de las piezas de la mano, el sistema de control, el de actuación y el de transmisión.

### 2.1 Estado de arte de las diferentes formas de fabricar en 3D la mano

#### 2.1.1 Material

Al diseñar mano hay que tener en cuenta entre otras cosas el material en el que se quiere fabricar. Esta elección estará condicionada al uso que se le vaya a dar. Dependiendo del uso y la esperanza de vida que se necesite podrá utilizarse un material u otro. Olvidando que pueda utilizarse un recubrimiento de materiales sintéticos para hacer la mano más realista, la estructura de la mano es en lo que se va a centrar este apartado.

La estructura de la mano puede realizarse con materiales metálicos o plásticos, o combinaciones de estos. Como por ejemplo el aluminio, fibra de carbono, titanio, polímero ABS, etc. Para el caso práctico se ha escogido un material plástico para la impresión 3D. Entre estos materiales plásticos utilizados en impresión 3D se encuentran el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el ácido poliláctico (PLA), las poliamidas, el alumide® (combinación entre poliamidas y aluminio en polvo), resinas, polipropileno (PP) o plásticos compuestos. El material plástico utilizado en el caso práctico, para este proyecto, es el ácido poliláctico (PLA).

El PLA se trata de un tipo de termoplástico hecho de almidón de maíz o caña de azúcar, siendo biodegradable y por ello más ecológico que otras opciones. Además de esta ventaja, el PLA resulta más fácil de imprimir que, por ejemplo, el ABS gracias a que su temperatura de impresión puede ser inferior. Por otro lado, una desventaja importante es que es mucho más frágil que otros materiales, sus componentes de biodegradabilidad hace que tenga una vida útil más corta [9]–[11].

### 2.1.2 Diseño

Para el prototipo llevado a cabo se ha escogido la impresión 3D. De esta manera se abaratan costes y resulta más cómoda su realización. En el hipotético caso de que al prototipo se le fuera a dar un uso prolongado, sería necesaria una labor de mantenimiento y sustitución de algunas piezas. El material cumple con su cometido de prototipo, pero no sería la solución más resistente, aunque sí la más barata.

Cuando se realizan este tipo de proyectos es importante tener en cuenta también las diferentes labores de mantenimiento que pueda suponer el uso de un material u otro.

Para la elección del diseño de la mano hay que tener en cuenta el mecanismo que se vaya a escoger para mover los dedos. Existen muchos programas en el mercado para el diseño en 3D, a la par que en internet se pueden encontrar infinidad de planos de proyectos de manos artificiales de uso público y gratuito. Es por ello por lo que hay que elegir o diseñar un modelo esbozado para funcionar con los componentes que requiere el prototipo.

La elección del modelo del prototipo se ha hecho a través de la página web *Thingiverse* [12]. Esta es una plataforma para el intercambio de diseños de impresiones 3D. Buscando diseños de manos se encuentran, además de diseños de manos macizas, una gran variedad de diseños de manos robóticas o prótesis. El motivo de la elección del diseño es la inclusión de los motores en el diseño. Este ha sido modificado, pero cómo punto de partida ha sido conveniente.

## 2.2 Sistemas de actuación y de transmisión

Los movimientos deseados para el prototipo son el de flexión y extensión de los dedos. Para ello se necesita un actuador que genere un movimiento a raíz de una orden de entrada y un sistema de transmisión que permitan hacer los movimientos mencionados.

### 2.2.1 Sistema de actuación: Estudio de los posibles actuadores y sensores que pueden utilizarse para articular la mano

El sistema de actuación se encarga de producir la potencia mecánica del sistema, los elementos que lo componen se llaman actuadores. Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de energía eléctrica, en el caso que concierne al proyecto. En otros casos la fuerza puede generarse también a partir de líquido o energía gaseosa [8]. Según esta definición se podría realizar la clasificación usando la *Fig.5*.

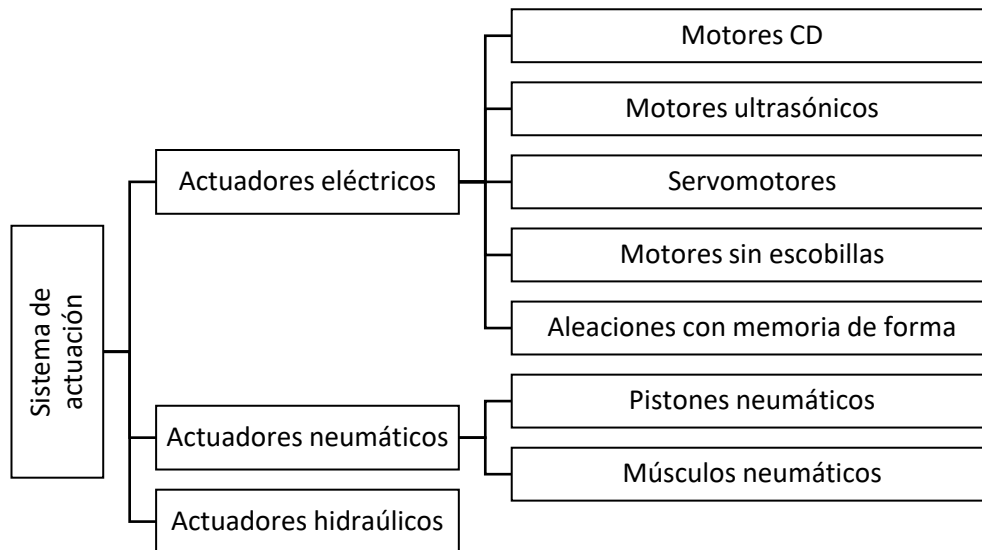


Fig. 5.- Clasificación de los principales actuadores para este tipo de proyectos [8]

### 2.2.1.1 Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos realizan la transformación de energía proveniente de una fuente eléctrica en energía mecánica. Además, son los actuadores más comunes en el diseño de prótesis de manos. Esto se debe a las ventajas que presenta frente a otros tipos de actuadores. Entre dichas ventajas se encuentra su alta eficiencia, su gran disponibilidad y a los tamaños compactos que suelen tener [8].

A continuación, se explican algunos de los diferentes tipos de actuadores eléctricos:

#### Motores CD

Dentro de los actuadores eléctricos es muy común el motor de corriente directa (CD). Estos elementos mecánicos se basan en los principios de fuerza electromagnética y de fuerza electromotriz inducida.

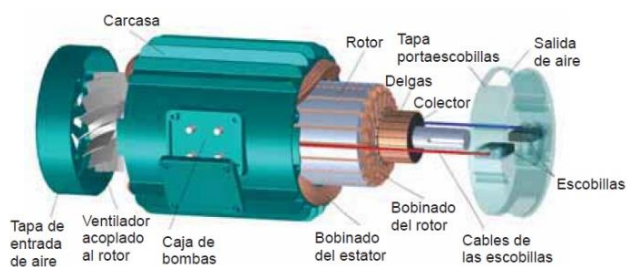


Fig. 6.-Perspectiva explosión de un pequeño motor de CD [33]

Este tipo de actuador está constituido por un estator y un rotor. En el estator están los polos del imán. Por cada polo el estator contiene uno o más devanados, estos están diseñados para llevar la corriente directa producida por un campo magnético. En la trayectoria de este campo se encuentran ubicados el rotor y su devanado. Cuando el devanado lleva intensidad de corriente se desarrolla un par que hace girar al motor, a consecuencia de del rechazo entre los polos del imán del estator y del rotor. Gracias al conmutador que está conectado al devanado,

el motor puede dar una fracción de vuelta y luego no detenerse, tal y cómo lo haría si no estuviera el conmutador. En la Fig.6 se pueden observar las partes explicadas.



*Fig. 7.- Micro motor plano de 1.5 a 3V DC [34]*

Este tipo de motores presentan las ventajas de que tienen buen rendimiento y fiabilidad, pues son de bajo costo y respuesta rápida. Además, el sentido de giro es invertible sólo con invertir el voltaje aplicado en sus terminales. Pero también hay que tener en cuenta que por la fricción producen calor y ruido, generan chispas, el rotor está sujeto a fuerzas centrífugas y el par máximo se produce a altas velocidades. En la Fig.7 se muestra un ejemplo de un motor DC, dónde también se observan los dos terminales de alimentación.

En resumen, la utilización de este tipo de actuador es versátil por sus ventajas principales: gran disponibilidad y variedad, alta eficiencia y fácil manejo [8], [13].

### **Motores ultrasónicos**

Los motores ultrasónicos, en particular los rotativos de onda viajera, están formados principalmente por 4 componentes: rotor, estator, electrodo y material piezoeléctrico. Este último es el elemento encargado de generar las microdeformaciones a partir de un nivel de voltaje. El material piezoeléctrico está adherido al electrodo, que es quien transmite las señales de excitación. El estator, conectado a estos dos componentes, transmite el movimiento por fricción al rotor. Así se crea un movimiento elíptico en el punto de contacto entre el rotor y el estator, dando lugar al movimiento del motor.

Estos motores tienen la ventaja de elevado par a bajas velocidades, rápida respuesta y buena parada. Además, son de funcionamiento silencioso y estructura simple, no les afectan campos magnéticos externos ni los generan. Una de sus desventajas es que necesita un suministro de potencia de alta frecuencia. Además, debido a la caída en las características par-velocidad con el tiempo y a la alta fricción entre el estator y el rotor, los motores ultrasónicos rotativos de onda viajera no tienen mucho tiempo de vida útil.

Este tipo de motores no ha tenido buena aceptación entre los diseñadores de prótesis por la dificultad de almacenamiento de energía, al necesitar de una fuente de alimentación de alta frecuencia [8].

## Servomotores

Este tipo de actuador es similar al motor CD. Aunque, mediante una señal externa de control, permite situar el eje de salida en una determinada posición angular.

En la Fig.8 se diferencian la caja de engranajes del motor y el controlador. El servomotor está constituido por carcasa, motor, engranes destinados a reducir la velocidad del motor y aumentar el par de salida, circuito electrónico para controlar la posición de salida y potenciómetro como sensor detector de la posición del eje de salida.

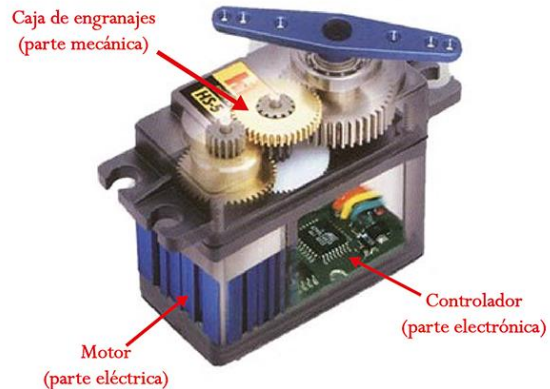


Fig. 8.- Partes de un servomotor[13]



Fig. 9.- Servomotor de modelismo[13]

Resultan relativamente sencillos de controlar. Se pueden conectar directamente a microcontroladores, el eje se puede desplazar hasta una posición específica. Resulta eficiente, pero una de sus desventajas es que no gira de manera continua. Se suele aconsejar alimentar los motores con una fuente diferente a la usada para los circuitos de control, de esta manera se evitan interferencias en los circuitos electrónicos. La Fig.9 muestra un ejemplo de servomotor utilizado en modelismo.

Desafortunadamente, el uso de este tipo de motores requiere que el movimiento completo del dedo se pueda realizar con el giro de  $180^\circ$ . Al utilizar este se deja de necesitar un sistema de reducción de velocidad [8].



### **Motores sin escobillas**

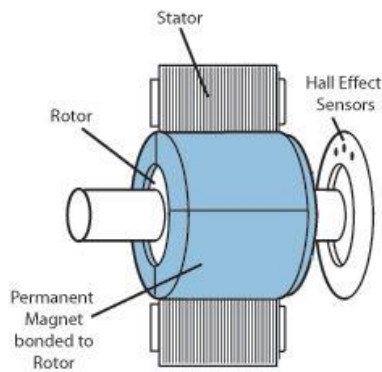


Fig. 10.- Motor DC sin escobillas [35]

En la Fig.10 se observan las partes de un motor DC sin escobillas, viéndose un ejemplar en la Fig.11. En los motores sin escobillas los magnetos permanentes rotan y la armadura permanece estática, siendo esta la principal diferencia frente a un motor CD convencional donde los electroimanes se mueven. Esto da a lugar a una gran ventaja que es que la armadura genera menos calor y hay menor pérdida por fricción al no haber rozamiento entre los magnetos permanentes. Tienen mayor vida útil, mayor eficiencia y menor peso. Todas estas ventajas encarecen el precio del motor frente a los motores CD convencionales y necesitan un control más complejo además de no cambiar la polaridad con la misma simplicidad [8].



Fig. 11.- Motor DC sin escobillas 28V [35]

### **Aleaciones con memoria de forma**

Las aleaciones con memoria de forma se pueden considerar como actuadores eléctricos ya que utilizan este tipo de energía para su funcionamiento. El funcionamiento consiste en que se deforman estando a una temperatura fría, y mediante un calentamiento regresan a la forma inicial. Para generar este calentamiento se suele hacer pasar una corriente eléctrica [8].



Fig. 12.- Nitinol (ejemplo de SMA<sup>1</sup>) [36]

Una de las principales aleaciones con memoria de forma es el Nitinol. Este material está compuesto de níquel y titanio. Las características que hacen a este material idóneo para diversas aplicaciones son la superelasticidad y la condición de material con memoria.

Las ventajas más características al utilizar este tipo de materiales en prótesis son: la generación de movimientos lineales, la ligereza del actuador, posibilidad de fabricación en casi cualquier forma y tamaño, alto nivel de recuperación plástica, resistencia a la corrosión y estabilidad frente a aplicaciones cíclicas. Sin embargo, necesitan de un manejo de temperaturas altas, los movimientos no son muy precisos, el tiempo de enfriado no está controlado completamente y la eficiencia energética es baja.

Debido a estas características, de momento para el uso que estamos estudiando en este trabajo no es un actuador muy indicado. El aumento de temperatura es un factor no deseado, además de que lograr la suficiente deformación para mover un dedo necesita de una cantidad considerable de SMA<sup>1</sup>, lo que aumentaría considerablemente la energía consumida. Según la investigación que se llevaba a cabo en el CDMIT de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, utilizando Nitinol para mover cada articulación se consumía un amper. Es por esto que no resultarían viables para manos protésicas, pero podrían ser una solución interesante para manos robóticas [8], [14].

#### *2.2.1.2 Actuadores neumáticos*

Estos tipos de actuadores se utilizan más para la generación de potencia en robótica que en prótesis.

##### **Pistones neumáticos**

Los cilindros neumáticos son dispositivos mecánicos capaces de transformar energía potencial del aire comprimido en energía cinética.

Existe un proyecto desarrollado por la universidad de Clarkson y de Vanderbilt donde se emplea un propelente de peróxido de hidrógeno como el gas generador de la potencia dentro de estos pistones controlados por servoválvulas.



*Fig. 13.- Cilindros neumáticos [15]*

Cómo sucede con otros actuadores, estos tienen más aplicación en manos robóticas que en prótesis [8], [15].

---

<sup>1</sup> S.M.A.=Aleaciones con memoria de forma (Shape-memory alloy)

### **Músculos neumáticos**

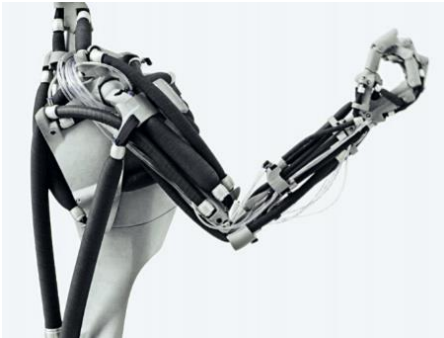


Fig. 14.- Brazo robótico "Airic's arm" [17]

Este tipo de actuador funciona a base de aire comprimido. Consiste en un tubo de goma cubierto por una red de plástico acomodada en forma de tijera (trenzada). Se infla con aire comprimido a baja presión, de tal manera que se hace más corto ejerciendo una fuerza a ambos extremos del tubo.

Tienen como ventajas que son ligeros, flexibles y ofrecen un movimiento lineal. Otra ventaja destacable es que se pueden lograr movimientos suaves. El inconveniente es que requieren de un sistema de compresión de aire, por lo que no son muy útiles para su uso en prótesis, puesto que esto hace el sistema más pesado y voluminoso. A la hora de diseñar una prótesis es muy importante tener en cuenta el peso y el tamaño de esta, ya que el portador de la prótesis va a tener que llevarla de continuo. Además del riesgo de posibles fugas de fluido y las dificultades a la hora de controlarlo. Es por ello por lo que se han utilizado este tipo de actuadores principalmente en manos robóticas. [8]

Un ejemplo de la utilización de esta tecnología es el brazo robótico *Airic's\_arm* (Fig.14). Este modelo está inspirado en la naturaleza, estando compuesto por huesos y músculos artificiales. Los músculos neumáticos están distribuidos análogamente a la que sería la distribución del brazo humano [16], [17].

#### **2.2.1.3 Actuadores hidráulicos**

El principio de funcionamiento de los actuadores hidráulicos es similar al de los actuadores neumáticos al transmitir la energía a través de tuberías. La energía es resultado del caudal y presión del aire o aceite que circula en el sistema.

Los actuadores hidráulicos ocupan menos espacio y con ellos se puede lograr más potencia. La mayor desventaja de este tipo de actuadores es la necesidad de un sistema de bombeo, aunque pueden proporcionar movimientos suaves y lineales. Desafortunadamente las bombas y las electroválvulas existentes en el mercado suelen ser demasiado grandes para ser utilizados para para manos robóticas o prótesis. Por ello suele ser necesario realizar el diseño a medida, siendo más costoso [8], [18].

#### 2.2.1.4 Características principales

En este apartado se muestran las características más importantes de los actuadores rotatorios, reunidas por Julio César Días Montes y Jesús Manuel Dorador González en las memorias del XV congreso internacional anual de la SOMIN<sup>2</sup>. Esta tabla se ha realizado comparando un gran número de actuadores de diversas marcas comerciales. En las características marcadas con \* los autores proponen una calificación de 1 a 10, en donde el número 10 indica el comportamiento más deseado cuando estos elementos son utilizados en prótesis de mano. En la segunda tabla se muestra la misma información, pero para actuadores con movimiento lineal.

TIPO DE ACTUADOR	Motor eléctrico	Motor a pasos	Motor ultrasónico	Servomotor eléctrico convencional	Servo con motor sin núcleo	Servo con motor sin escobillas
Peso/Costo*	8	7	4	8	8	5
Torque/Costo*	9	8	5	9	10	6
Torque/Peso*	8	6	7	8	9	10
Disponibilidad en el mercado*	10	9	6	10	10	8
Confiabilidad*	8	9	7	10	10	10
Vida útil*	7	8	4	7	8	10
Flexibilidad y acoplamiento directo a otros sistemas mecánicos*	6	7	7	7	7	7
Cuidados y mantenimiento*	7	8	8	8	8	10
Ruido producido en relación con el tamaño del actuador*	7	7	7	7	7	9
Eficiencia (%)	<80	<80	<50	<80	<90	<95
Peso mínimo	gr	dgr	gr	dgr	gr	gr
Tamaño mínimo	mm	cm	mm	cm	cm	cm
Temperatura de operación (°C)	-20-85	-20-85	-10-50	-20-85	-20-85	-20-85
Máx. temperatura alcanzada (°C)	125 (En rotor)	85 (En superficie)	55 (En superficie)	125 (En rotor)	125 (En rotor)	75 (En superficie)
Precisión	-	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado
Tipo de energía utilizada	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA
Tipo de movimiento	Rotatorio	Rotatorio	Lineal / Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio
Actuación bidireccional	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Requerimiento de aditamentos adicionales	No	No	No	No	No	No
Movimientos amortiguados	No	No	No	No	No	No

\*La clasificación se hace de 1 a 10. 10 indica el mejor comportamiento.

Tabla 1.- Características de los actuadores rotatorios[8]

<sup>2</sup> S.O.M.I.N.=Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica

TIPO DE ACTUADOR	Aleaciones con memoria de forma	Músculos neumáticos	Pistón eléctrico actuado por SMA	Pistón hidráulico (Solo el actuador)	Pistón neumático (Sólo el actuador)
Peso/Costo*	10	7	9	6	7
Fuerza lograda/Peso*	8	9	6	10	8
Fuerza lograda/Costo*	7	9	6	10	8
Disponibilidad en el mercado*	6	4	6	10	10
Confiabilidad*	4	6	5	7	6
Vida útil*	4	7	4	7	7
Flexibilidad y acoplamiento directo a otros sistemas mecánicos*	9	8	9	8	8
Cuidados y mantenimiento*	6	6	6	8	8
Ruido producido en relación al tamaño del actuador*	10	8	9	8	8
Eficiencia (%)	<10	<40	<10	<85	<85
Peso mínimo	dgr/m	dgr	gr	dgr	dgr
Tamaño mínimo	Ø µm	Ø mm	cm	cm	cm
Temperatura de operación (°C)	-	0-50	-75-75	**	**
Máx. temperatura alcanzada (°C)	>500	-	-	**	**
Precisión	µm	mm	µm	mm	mm
Tipo de energía utilizada	CD/CA	-	CD/CA	-	-
Tipo de movimiento	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal
Actuación bidireccional	Si	No	No	Si	Si
Requerimiento de aditamentos adicionales	No	Si	No	Si	Si
Movimientos amortiguados	Si	Si	Si	Si	Si

\*La clasificación se hace de 1 a 10. 10 indica el mejor comportamiento.

Tabla 2.- Características de los actuadores lineales[8]

### 2.2.2 Sistema de transmisión: Diversos algoritmos para controlar la velocidad o posición de los dedos

En el diseño de manos robóticas o prótesis de miembros superior se busca que los movimientos no sean bruscos. Algunos actuadores de los mencionados en el apartado anterior por si solos ya hacen movimientos suaves. Pero la mayoría de los actuadores utilizados, cómo es el caso de los motores eléctricos, trabajan a demasiada velocidad. Para alcanzar estos movimientos suaves en estos últimos actuadores es necesaria la utilización de mecanismos que reduzcan la velocidad.

### *2.2.2.1 Sistemas de reducción de velocidad*

Un tipo de mecanismo reductor de velocidad muy común para estas aplicaciones estudiadas en el trabajo son los constituidos por engranes.

Los engranes son ruedas dentadas que transmiten movimiento circular mediante el contacto de los dientes entre dos de ellas. Para lograr reducir considerablemente la velocidad de salida se utiliza un tren de engranes. Los trenes de engranes son conjuntos de más de dos engranes.

Los engranes pueden estar fabricados mediante diferentes procesos y de diversos materiales. Los engranes rectos tienen un diseño más sencillo, gran disponibilidad y mucha variedad de tamaños, aunque sus medidas estén estandarizadas. Además, tienen buena duración, resistencia y relación de transmisión.

A la hora de unir los engranes para formar el tren de engranes, hay que tener especial cuidado en que los engranes a unir estén paralelos entre ellos y en que los dientes de estos hagan contacto directo. Otra posibilidad de agrupación de engranes son los engranes planetarios. Se trata de uno o más engranes externos que giran sobre un engrane central. Cada uno de estos componentes puede ser la entrada, la salida o estar estacionario [8].

### *2.2.2.2 Mecanismos para mover los dedos*

Existen diversos sistemas utilizados para este fin, generar el movimiento de los dedos y lograr la flexión-extensión, y en algunos casos la oposición del pulgar.

Uno de los sistemas más antiguos es el uso de cables y poleas, con el fin de lograr el movimiento de flexión-extensión. Generalmente el cable atraviesa las articulaciones y la última falange está conectada a la salida del sistema de actuación, de tal manera que cuando este sistema aplica una carga, el cable se desliza a través de la polea, moviendo la falange. Si se utiliza el cable para atravesar todo el dedo, con un único actuador se puede hacer el movimiento de flexión del dedo completo [8].

Por otro lado, es necesario otro sistema que realice el movimiento de extensión. Una opción sería la utilización de resortes a torsión ubicados en las articulaciones. Unos ejemplos de resorte de torsión son el alambre que se encuentran en las pinzas comunes de tender la

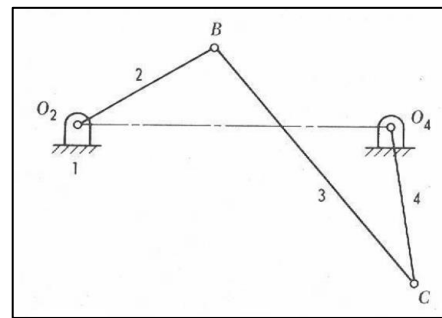


*Fig. 15.- Resorte de torsión helicoidal [19]*

ropa o en las trampas para ratones. Se observan en la *Fig.15* diferentes formatos de resortes de torsión helicoidal. Este tipo de resortes se utilizan para retornar o desplazar piezas a un escenario inicial. Este escenario cambia al aplicarle una fuerza externa (el actuador), cuando esta fuerza deja de existir el resorte a torsión anula los efectos de la fuerza externa volviendo a la situación inicial. [19] La parte positiva de esta práctica es la sencillez en su funcionamiento, la alta flexibilidad y ligereza, pudiendo adaptarse con mayor facilidad los dedos a las formas de los diferentes objetos a agarrar. El inconveniente es que sólo puede transmitir cargas relativamente pequeñas y necesita ser ajustado periódicamente para que el cable no se destense.

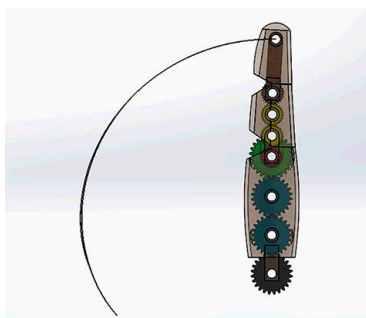
Para lograr el movimiento de extensión también se puede utilizar otro cable en arreglo antagónico. En total habría dos cables por dedo, moviéndose uno en sentido contrario al otro. En este caso se necesitarían un actuador por cada cable, con todo lo que ello conllevarse, en coste, peso y volumen.

También se puede realizar el movimiento de los dedos sin utilizar cables, mediante mecanismos compuestos por barras. Estos mecanismos son secuencias cerradas de eslabones conectados por articulaciones, como el mecanismo dibujado en la *Fig.16*. Más concretamente, el mecanismo de cuatro barras transforma el movimiento según un esquema deseable, desarrollando fuerzas de muy baja intensidad y



*Fig. 16.- Mecanismo de cuatro barras [3]*

transmitiendo poca potencia. El inconveniente de este mecanismo, a pesar de ser preciso, es que trabaja en dos dimensiones, por lo tanto, si no se realiza un buen diseño del mecanismo puede dar lugar a posiciones de bloqueo. Sin embargo, los mecanismos de barras son capaces de funcionar siendo alimentados tanto con movimientos circulares como rectos, a diferencia de lo que sucede con los cables.



*Fig. 17.- Dedo protésico con mecanismo hexacicloidal*

Especialistas de la Facultad de Ingeniería (FI) de la UNAM desarrollaron un dedo protésico con mecanismo hexacicloidal, donde se utilizaban engranajes para el sistema de transmisión. El sistema consiste de seis engranes planetarios que giran mediante un motor sobre un mecanismo central, como se puede ver en la *Fig.17*. Al girar el motor, el giro se transmite entre los engranajes, consiguiendo así mover todo el

dedo. Además de los engranajes el dedo cuenta con una barra en la punta del dedo. Un punto ventajoso de este mecanismo es que permite hacer más fuerza que otros [3], [8], [19], [20].

### 2.2.2.3 Características principales

En este apartado se muestran las características más importantes de los sistemas de transmisión reunidas por Julio César Días Montes y Jesús Manuel Dorador González en las memorias del XV congreso internacional anual de la SOMIN. Esta tabla se ha realizado comparando un gran número de elementos de diversas marcas comerciales. En las características marcadas con \* los autores proponen una calificación de 1 a 5, en donde el número 5 indica el comportamiento más deseado cuando estos elementos son utilizados en prótesis de mano.

Dispositivo	Cadenas	Correas	Engranes	Levas	Tornillo sin fin	Piñón-cremallera	Barras	Ruedas de fricción	Cables Bowden	Junta Universal	Cable-polea simple
Tamaño mínimo	mm	mm	mm	---	---	---	---		um	mm	mm
Eficiencia máxima	98%	98%	99%	---	98%	---	---	---	---	94%	---
Capacidad de transmisión de potencia*	5	3	5	5	5	5	5	2	3	5	3
Resistencia mecánica*	5	3	5	5	5	5	5	2	4	5	4
Precisión en los movimientos*	4	4	5	5	5	5	5	3	4	3	4
Facilidad de ensamble*	3	4	2	4	3	4	4	5	5	4	5
Componentes adicionales	No	No	No	Si	No	No	No	No	Si	Si	No
Continuidad en el movimiento*	3	3	5	5	5	5	3	3	4	4	4
Mantenimiento*	2	4	3	3	3	4	5	4	4	4	4
Relación de transmisión máxima	10:1	15:1	100:1	---	360:1	---	---	---	---	---	---
Disponibilidad en el mercado*	5	5	5	4	4	5	---	4	5	5	5

\*La clasificación se hace de 1 a 5. 5 indica el mejor comportamiento.

Tabla 3.- Características de los sistemas de transmisión[8]



## 2.3 Sistema de control

El sistema de control es el encargado de controlar el movimiento de los dedos. Es el que se encarga de poner en funcionamiento el sistema de actuación. El sistema de control puede ser accionado por una persona o automáticamente según una previa programación.

En las prótesis mioeléctricas, surgidas en Rusia de 1960, el sistema de control es el cuerpo del portador. Estas prótesis funcionan con pequeñas diferencias de potencial extraídas durante la contracción de las masas musculares del muñón. Las diferencias de potencial son conducidas y amplificadas para obtener el movimiento de la mano artificial.

Otro sistema de control que ha sido utilizado simultáneamente en prótesis es un mecanismo fonoacústico. Las ordenes se transmiten por medio de un micrófono incorporado a la prótesis, que realizará el movimiento correspondiente a la predeterminada programación.

Un sistema más innovador, en el que se están consiguiendo nuevos logros, es controlar las acciones de la mano con la mente. Médicos e ingenieros biomédicos de la Universidad Johns Hopkins (Baltimore, EEUU) han conseguido mover dedos de forma individual e independiente con las señales eléctricas generadas por el cerebro [3], [21].

## 2.4 Componentes del prototipo

A continuación, se mencionan brevemente los elementos elegidos para el prototipo, que se explican con más detalle en el [Capítulo 3](#):



*Fig. 18.- Prototipo*

- Sistema de actuación → Motor DC
- Sistema de transmisión → Cuerda y bobina
- Sistema de control → Motor shield y Arduino  
(accionado manualmente por PC)

En la Fig.18 se puede ver el prototipo finalizado. Este ha sido impreso mediante la técnica de impresión 3D pieza por pieza para después ser montado. La mano contiene dentro el sistema de actuación, los motores, que son tapados por la pieza que simula la palma de la mano, y el sistema de transmisión, la cuerda y la bobina, que se encuentran dentro de los dedos. Detrás de la mano se encuentra el sistema de actuación, el Arduino, junto con el motor shield. Estos últimos se encuentran conectados a su vez al ordenador por el cable USB y a la mano a través de los cables de colores que se aprecian en la imagen. En el siguiente capítulo se explican y se enseñan más claramente estas conexiones.

### 3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Este capítulo se va a centrar en el estudio y la aplicación de un componente relativo a cada uno de los apartados vistos en el capítulo anterior.

El prototipo presentado para este trabajo consiste en una mano robótica realizada con una impresora 3D cuyo funcionamiento es controlado mediante Arduino UNO.

Los sistemas de actuación y transmisión están compuestos por motores DC, sistema de cuerdas y gomas. En la Fig.19 se esquematiza la distribución de los elementos del prototipo según la función que cumplen en este.

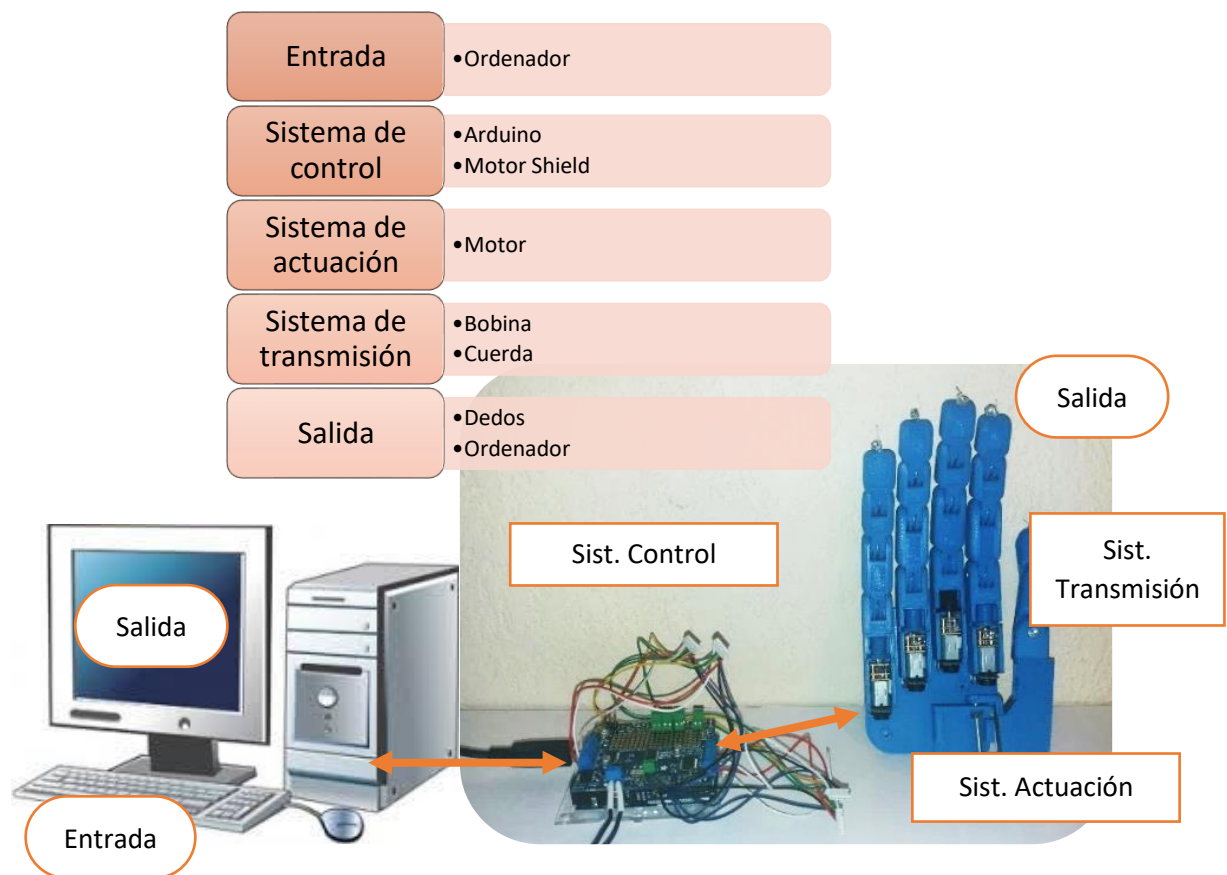


Fig. 19.- Sistema completo

### 3.1 Definición del sistema

En este apartado se esboza el método de funcionamiento. En términos generales el sistema funciona con una señal de entrada que es procesada a lo largo del sistema dando como resultado el movimiento esperado en los dedos y la información del movimiento en el monitor serie. El diagrama de flujo del comportamiento general del sistema se esboza en la Fig.20.

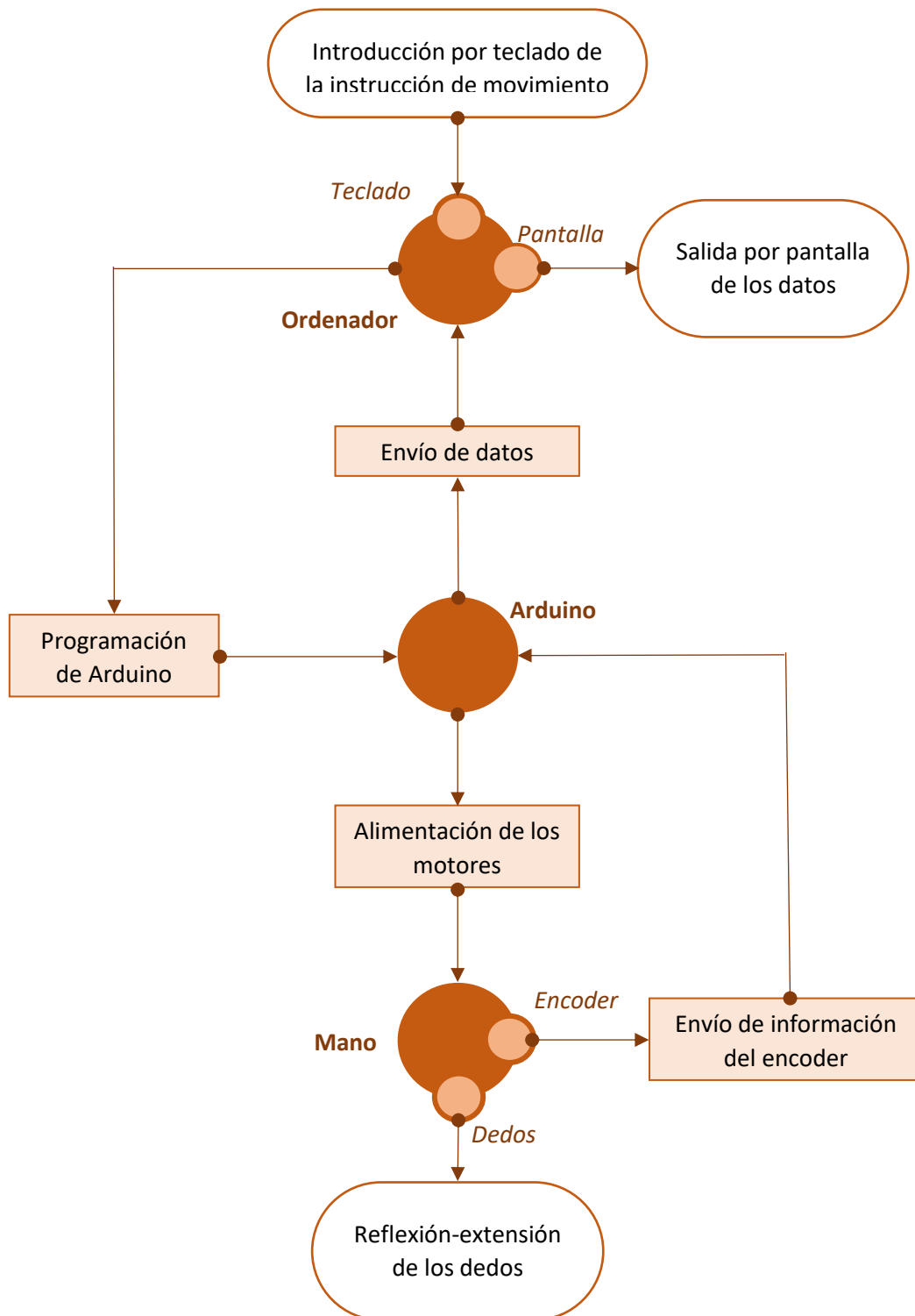


Fig. 20.- Diagrama de flujo

Tal y como se resume en las *Fig.19-20* el sistema funciona con una orden de entrada que es introducida por teclado al ordenador, y se transmite mediante el cable USB a la placa microcontroladora Arduino, previamente programada. Una vez llega la señal a la placa, esta la procesa y alimenta a los motores, que hacen girar las bobinas. Al girar las bobinas la cuerda se recoge en estas, haciendo que los dedos se retraigan o se extiendan dependiendo de si la cuerda se está tensando o destensando. A la vez que el motor funciona, el codificador genera una señal que recibe la placa sobre la velocidad y sentido de giro del motor. Esta señal es procesada por Arduino y enviada al ordenador donde se muestra la información que esta contiene.

El ordenador cumple con la función de ser el terminal desde el cual se programa la placa microcontroladora Arduino, además de ser el puerto de entrada de las ordenes. En otras palabras, el ordenador es el medio que tiene el usuario para poder comunicarse con el Arduino para realizar las tareas que quiera. Además, el ordenador también es un terminal de salida, puesto que es a través de él como se conocen los resultados de los experimentos.

Arduino se encarga de controlar los motores usando un shield de potencia en función de la orden que reciba por USB del ordenador, formando parte del sistema de control. También recibe la señal de los codificadores y luego es transmitida por el cable USB al ordenador. Esta señal contiene los datos de velocidad y sentido de giro del motor.

Los motores, dentro del procedimiento de actuación, tienen un sistema de reducción de velocidad que hace que las bobinas giren a menos velocidad de lo que lo hacen los motores. Cada dedo tiene una cuerda por dentro que recorre todas las falanges y termina en las bobinas, siendo este el sistema de transmisión de movimiento. Cuando las bobinas giran, estas se recogen en las bobinas y esto hace que se muevan los dedos.

En los siguientes subapartados se encuentran más detalladamente explicados todos los componentes que forman el prototipo, su funcionamiento y como han de ser colocados. Para que los apartados sean más sencillos de entender, primero se explica la mecánica de la mano.

## 3.2 Componentes

La parte de diseño del prototipo se ha basado en un proyecto de **Álvaro Villoslada** llamado **Dextra**, modificándolo para adaptarlo a motores y control electrónico diferentes. Dicho proyecto está efectuándose como parte de un proyecto destinado a elaborar una prótesis de mano robótica de bajo coste. [22]

La electrónica del prototipo propuesto en este TFG está conformada por cuatro motores, cuatro codificadores magnéticos, un *motor shield* y la placa Arduino UNO. Otros componentes utilizados son cable USB tipo A/B, sedal de pesca de 0.6mm, conectores, gomitas de los brackets, tornillos y tuercas (ver Fig.21).

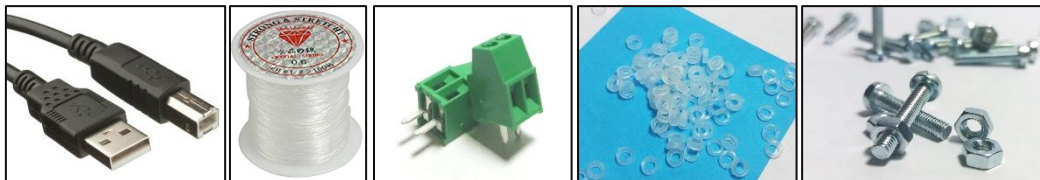


Fig. 21.- Otros componentes

### 3.2.1 Piezas

Las piezas que forman la estructura de la mano han sido obtenidas a través de impresión 3D. Los diseños iniciales eran los compartidos por Álvaro Villoslada con la comunidad de hackaday.io[23] y thingiverse[24]. Al avanzar en el proyecto se han encontrado faltas de compatibilidad del diseño con los demás elementos utilizados, por lo que estos diseños de Álvaro Villoslada han sido modificados en algunos detalles. Para ello se ha utilizado el programa *SketchUp*". El dedo índice, medio, anular y meñique tienen el mismo diseño, el que varía respecto a los demás es el pulgar. Este último es algo más grueso que los demás y está formado por una pieza menos.

Haciendo una analogía de las piezas con los huesos para los dedos índice, medio, anular y meñique (ver Fig.22) se distinguen cuatro piezas, las piezas relativas a las falanges distal, medial y proximal más una última pieza que podría considerarse la relativa a los huesos metacarpianos. La función principal de esta última pieza es la de sujetar al motor. Para el dedo pulgar, sin embargo, se distinguen tres piezas, las piezas relativas a las falanges distal y proximal y la que se encargaría de sujetar el motor, cómo en los otros dedos.



Fig. 22.-Anatomía de la mano humana [37]

Además de los dedos ha sido necesaria la impresión de las dos piezas que forman la palma de la mano, que sirven de sujeción para los dedos; una bobina para cada dedo, que se encarga de enrollar el hilo cuando el motor gira tensando este hilo; y, por último, la pieza necesaria para el movimiento que realizaría el abductor.

### 3.2.2 Mecanismo de la mano

Haciendo referencia al sistema de transmisión explicado en el [apart.2.2.2](#), el movimiento de los dedos se genera con un mecanismo de cables y poleas. Para cada dedo se necesita una bobina impresa en 3D, un trozo de sedal de pescar y dos o tres gomitas pequeñas, además de las piezas que conforman el dedo.

Las impresiones de las falanges del dedo llevan una posición que debe ser respetada a la hora de encuadrar cada dedo, hay que recordar que las piezas que componen cada dedo son análogas a los huesos de los dedos humanos. Se diferencian las piezas relativas a las falanges distal, medial, proximal y el conjunto de los huesos metacarpianos (ver fig.22). Tras encajar las piezas del dedo, existe un camino que lo atraviesa este con la finalidad de que pase por ahí el cable. Este camino se puede apreciar en las vistas diédricas del [apart.3.3.7](#). Con el cable atravesado y las piezas encajadas y atornilladas, el cable queda sujeto a la falange distal (ver fig.22). Para que el dedo haga el movimiento de flexión el cable ha de ser enrollado en la bobina que se encuentra en la pieza análoga a los huesos



Fig. 23.- Dedo colocado

metacarpiños (ver fig.22). Para recoger el cable en la bobina, se hace girar la bobina gracias al sistema de actuación, el motor. Y así es cómo resulta el movimiento de flexión.

Para el movimiento de extensión es necesario un mecanismo que funcione como un resorte a tensión. Este mecanismo lo llevan a cabo las gomitas. Cuando el motor gira en el sentido contrario al del movimiento de flexión, la cuerda se destensa y la fuerza que ejercen las gomitas en las uniones de las piezas hace que se extienda el dedo.

Hay que tener en cuenta que para que este mecanismo funcione correctamente, las gomas tienen que encajar justas. Esta tirantez continua hace que un punto débil de este mecanismo sea que haya que cambiar periódicamente las gomitas. Además, si al abrir el dedo se realizan muchos más giros en el motor de los necesarios se puede llegar a invertir el efecto del sentido de giro de los motores. Hay que tener esto presente al manipular el prototipo para no terminar confundiendo la relación entre los sentidos de giro y el tipo de movimiento del dedo.

### 3.2.3 Arduino UNO



*Fig. 24.- Placa Arduino UNO*

La placa microcontroladora Arduino UNO basada en el microcontrolador ATmega328P puede considerarse una placa para principiantes dentro de la familia Arduino. Este modelo fue la versión de partida de Arduino, existiendo hoy en día en el mercado placas con mayores prestaciones, cómo podrían ser las placas Arduino MEGA o Arduino ZERO, por ejemplo.

Arduino UNO consta de 14 pines de entrada/salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM<sup>3</sup>), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio. Para programar la placa hace falta conectar esta al ordenador con un cable USB tipo A/B.

<sup>3</sup> P.W.M.=Pulse-Width Modulation



La diferencia entre los puertos USB tipo A y tipo B es únicamente en apariencia. Ambos tipos de puerto tienen el mismo número de pines y son eléctricamente idénticos. [25][26]

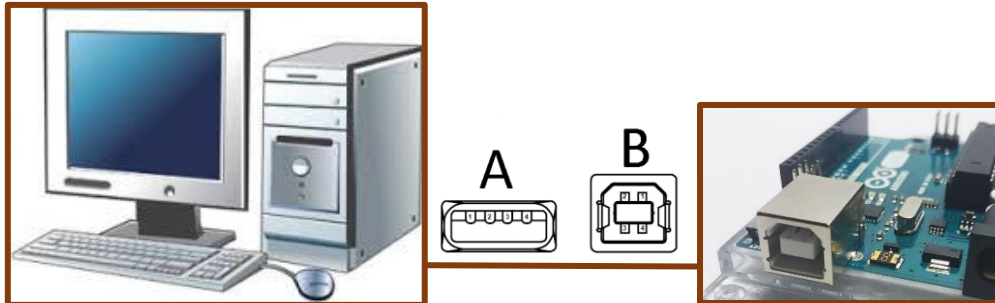


Fig. 25.- Conexión ordenador-Arduino mediante cable USB tipo A/B [25]

A continuación, se adjunta la tabla de características de la placa Arduino UNO:

Microcontrolador	: <b>ATmega328P</b>
Tensión de funcionamiento	: <b>5 V</b>
Tensión de entrada (recomendado)	: <b>7-12 V</b>
Tensión de entrada (límite)	: <b>6-20 V</b>
Pines Digitales I/O	: <b>14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)</b>
Pines PWM Digitales I/O	: <b>6</b>
Pines analógicos de entrada	: <b>6</b>
Corriente CC por pin de E/S	: <b>30 mA</b>
Corriente CC para el pin 3.3V	: <b>50 mA</b>
Memoria flash	: <b>32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB utilizado por bootloader</b>
SRAM	: <b>2 KB (ATmega328P)</b>
EEPROM	: <b>1 KB (ATmega328P)</b>
Velocidad de reloj	: <b>16 MHz</b>
LED_BUILTIN	: <b>13</b>
Longitud	: <b>68,6 mm</b>
Anchura	: <b>53,4 mm</b>
Peso	: <b>25 g</b>

Tabla 4.- Especificaciones técnicas Arduino UNO [10]

### 3.2.4 Motor shield

Los Motor Shield son muy útiles a la hora de utilizar motores con Arduino. La versión utilizada para el prototipo se trata de *Adafruit Motor Shield v2.3*. Para controlar un motor DC desde Arduino, es necesaria la utilización de drivers para motores, con



Fig. 26.- Motor Shield v2.3



el fin de proporcionar más corriente al motor, teniendo en cuenta que las salidas del Arduino sólo dan hasta 40mA[27].

La utilización de este elemento facilita controlar más de un motor con Arduino. Soporta motores paso a paso, motores DC y servomotores. A continuación, se enuncian algunas de sus características:

- Comunicación I2C con la placa de Arduino. Permite conectar más componentes a través de comunicación síncrona ocupando sólo dos pines.[28]
- Soporta hasta 32 shields conectados en serie
- Tiene 2 conexiones para servos de 5V
- Posibilidad de mover motores desde 4.5V a 13.5V
- Se pueden conectar 4 motores DC con movimiento adelante y atrás y control de velocidad de 8bit, sin contar el 0.5% de giro de resolución
- Hasta 2 motores paso a paso (unipolar o bipolar)
- Con la finalidad de eliminar ruido se pueden separar las fuentes de alimentación del Motor Shield (los motores) y del Arduino (la lógica)
- Compatibilidad con Arduino UNO, Leonardo, Mega, Diecimila y Duemilanove
- Librería disponible de Arduino
- Compatible con los niveles lógicos de 5V y 3.3V

[29], [30]

#### *3.2.4.1 Incorporación en el prototipo*

Al comprar el Motor Shield trae sin conectar los pines que servirían para acoplarlo a la placa Arduino, pero viene acompañado de una tira de pines macho y un jumper. El jumper puede utilizarse para cerrar el circuito en los pines “V<sub>in</sub> Jumper” si no se quisiera separar las fuentes de alimentación. También sirve para la comprobación inicial de si se conecta correctamente el shield. Se realizaría dicha comprobación conectando el jumper cerrando el circuito mencionado y si la conexión fuera correcta se encendería la luz led del shield. Esta luz se enciende también al alimentar externamente el Motor Shield.

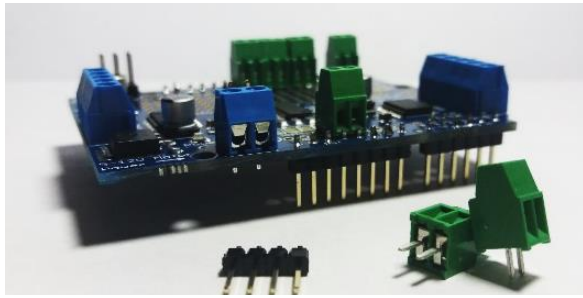


Fig. 27.- Motor Shield, pines macho y conectores

Para hacer el acoplamiento con la placa Arduino es necesario soldar los pines al Motor Shield (ver Fig.27). Existen dos tipos de pines, los macho y los hembra. Los pines hembra permiten utilizar el resto de pines de la placa a la que se conecta el shield. En el caso de este proyecto se han soldado los pines machos que venían y unos conectores en los puntos de conexión análogos a los pines que se necesitan, cómo se aprecia en la imagen contigua.

Una vez hechas las soldaduras, ya se puede conectar el Motor Shield a los demás elementos, como se ve en la Fig.28. Puesto que se utilizan cuatro motores, uno para cada dedo, sin contar el dedo pulgar, con un Motor shield es suficiente. Habría que conectar el Arduino al shield, además de conectar al este último: las fuentes de alimentación (color rojo y gris) de los motores, las salidas de los codificadores (color amarillo y verde), la alimentación de los codificadores (azul y negro) y la alimentación del propio Motor Shield (negro con línea gris y negro). El siguiente esquema muestra las conexiones: [29], [30]

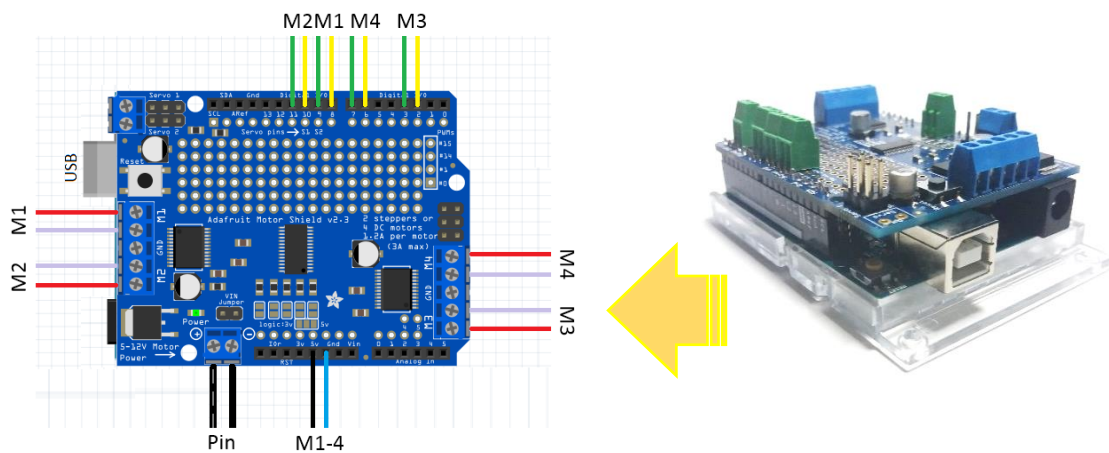


Fig. 28.- Conexionado

Al conectar todo a la mano el resultado queda como en la Fig.29:

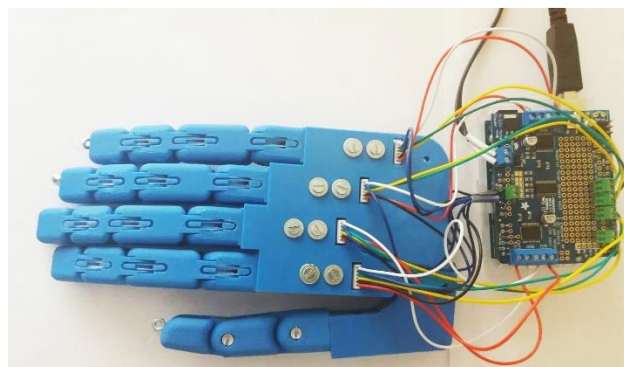


Fig. 29.- Conexión completa de la mano

### 3.2.5 Motor

El modelo de motor DC utilizado incluye un codificador magnético incorporado que facilita el control del motor. El modelo concreto es “Angelelec DIY Sources Direct Current Motor, Metal Gear Reducer Motor With Encoder (380:1), with 9mm long d-shapes metal output shaft”, número de referencia: FIT0487. Al comprar este motor (ver Fig.30), el paquete incluye los cables para conectar el motor y el encoder a la alimentación, y en el caso del encoder también los cables relativos a las salidas de fase.

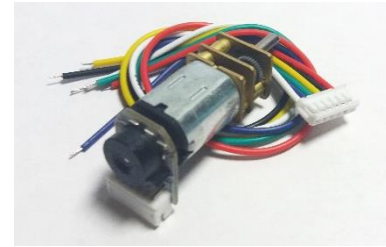


Fig. 30.- Motor DC empleado

El motor utilizado tiene las especificaciones reunidas a continuación, que resultan más que suficientes para el funcionamiento del prototipo:

<i>Tensión nominal :</i>	<b>6 V</b>
<i>Velocidad del motor :</i>	<b>15.000 rpm</b>
<i>Relación Gearbox :</i>	<b>380:1</b>
<i>Longitud del reductor :</i>	<b>9 mm</b>
<i>Velocidad sin carga :</i>	<b>41 rmp @ 6 V</b>
<i>Corriente sin carga :</i>	<b>60 mA</b>
<i>Esfuerzo de tensión nominal :</i>	<b>2,5 kg/cm</b>
<i>Velocidad nominal :</i>	<b>24 rpm @ 6V</b>
<i>Corriente nominal :</i>	<b>170 mA</b>
<i>Permite un esfuerzo de tensión instantáneo de menos de :</i>	<b>2,8 kg/cm</b>
<i>Resolución de realimentación Hall :</i>	<b>760</b>
<i>Peso :</i>	<b>18 g</b>

Tabla 5.- Características motor

El hecho de que el motor disponga de codificador magnético es lo que permite obtener una información del motor. Gracias a los sensores de efecto Hall, el codificador brinda información como la cantidad de giros que está dando el motor y en qué sentido. Esto ayuda en la labor de la revisión de movimiento. El funcionamiento del motor junto al shield forman parte del sistema de actuación, explicado en el [apart.2.2.1](#).

En la Fig.31 se muestra el dibujo del motor DC utilizado. Mirándolo con atención se puede ver que este motor tiene un sistema de reducción de velocidad, conseguido por medio de engranajes.

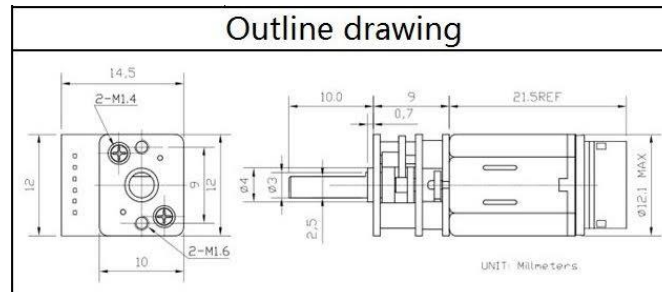


Fig. 31.- Esquema dibujo del motor

Además, el motor tiene incorporado un codificador que sirve de sensor para la obtención de los datos de giro del motor.

Cómo se ve en la Fig.32 el codificador cuenta con cuatro entradas y dos salidas. Por un lado, están los pines destinados a la alimentación del motor (pin nº1 y nº6) y los pines destinados a la alimentación del codificador magnético (pin nº2 y nº5). Por otro lado, están los dos pines de salida (pin nº3 y nº4), que son los pines encargados de transmitir la información del motor obtenida por el codificador magnético.

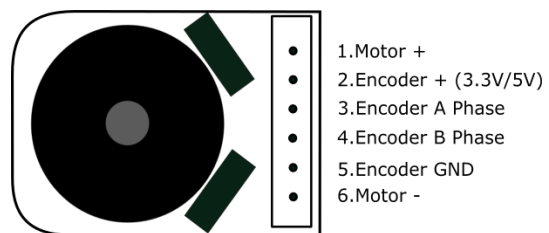


Fig. 32.- Esquema pines codificador

Para acoplar los cinco motores a la placa Arduino UNO se emplea un Motor Shield V2.3 de Adafruit, cómo se h explica en el siguiente apartado.

### 3.2.6 Método de control de los motores

Para realizar la labor de control del prototipo se necesitan la información procedente de las salidas de fase del codificador (cables verde y amarillo).

Para entender mejor cómo se interpretan las salidas de estos pines se explica a continuación el funcionamiento del codificador.

### 3.2.6.1 Funcionamiento del Codificador:

El codificador se trata de un codificador magnético. Consta de dos sensores de efecto Hall y un disco magnético giratorio. El disco magnético está colocado en el eje de trasero del motor, de tal manera que cuando el motor gira, gira también el disco magnético. Los sensores de efecto Hall son los que crean los pulsos digitales en función de los giros que detectan. Este mecanismo está dibujado en la Fig.33.

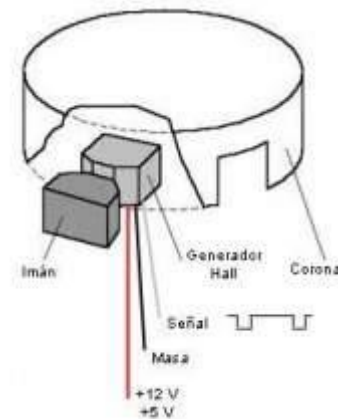


Fig. 33.- Sensor de efecto Hall [31]

Gracias a los dos sensores y que la posición de estos sea de noventa grados entre ellos, en las dos secuencias que se obtienen se puede saber la dirección y el número de desplazamientos de giro del eje.

En la Fig.34 se explica la interpretación de estas señales del codificador. Se necesita información de más de un punto temporal para poder determinar las características del movimiento, puesto que se deducen a partir de la secuencia obtenida.

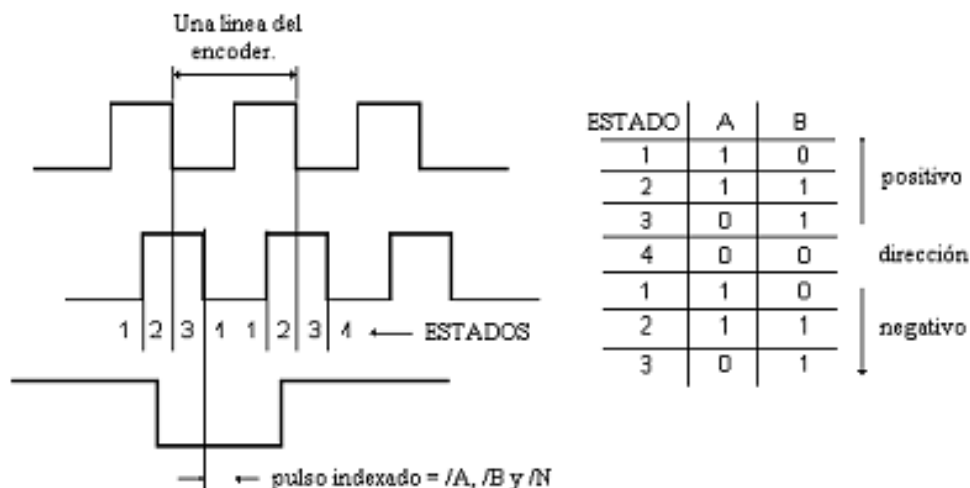


Fig. 34.- Interpretación de las señales del codificador [31]

### 3.2.6.2 Utilizar el codificador con Arduino

La opción más eficiente para detectar la información del movimiento en este prototipo consiste en realizar una programación tal que cada vez que cambie de valor la señal en los pines el programa lo detecte.

Para realizar esta acción Arduino tiene una función que es “attachInterrupt()”. El inconveniente de esta función es que precisa de que el pin en el que se aplica esté dotado de ciertas características. Al estar utilizando Arduino UNO, los únicos pines que soportan esta funcionalidad son los pines 2 y 3 [31].

Por lo tanto, para aprovechar el microcontrolador Arduino UNO, se han realizado varios escenarios. En uno de ellos se controla un único motor mediante “attachInterrupt” y en el otro se controlan los cuatro dedos leyendo el valor de la señal del codificador periódicamente.

### 3.2.7 Resumen de componentes

#### 3.2.7.1 Impresiones 3D

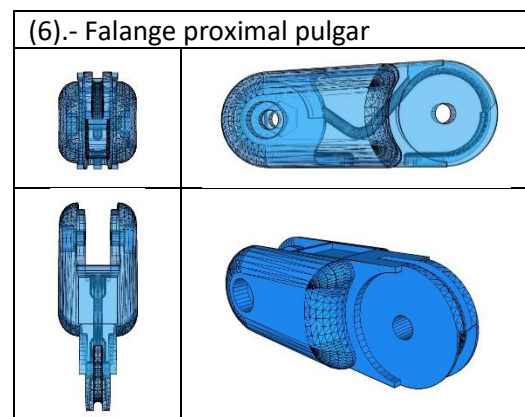
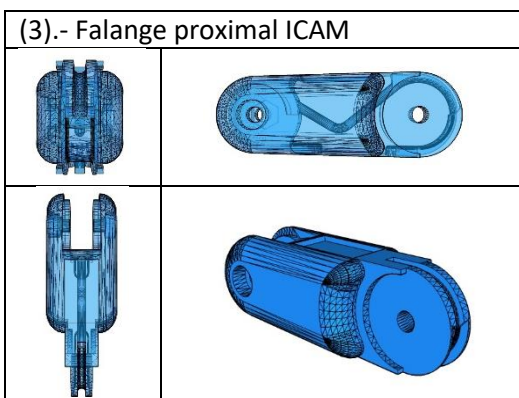
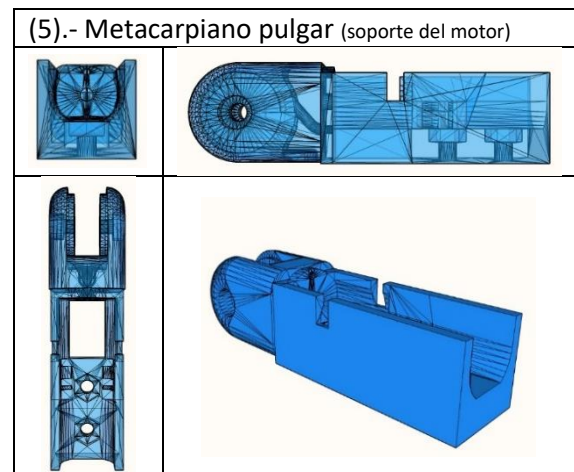
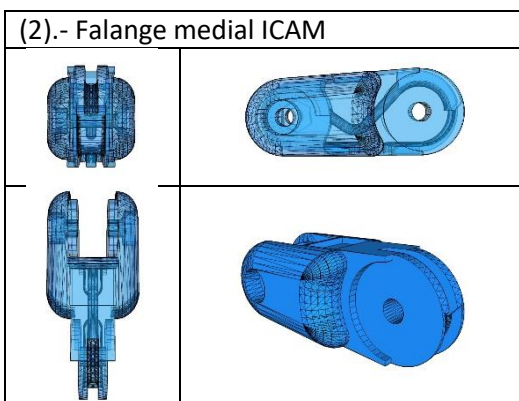
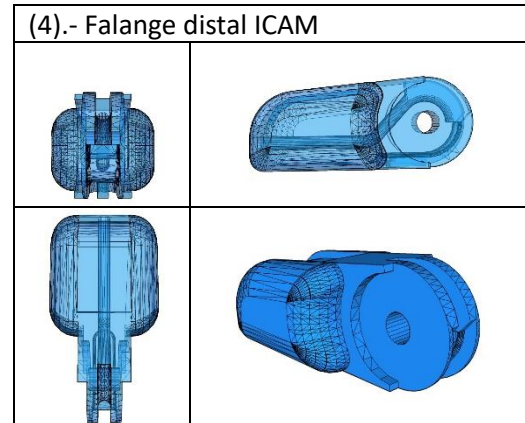
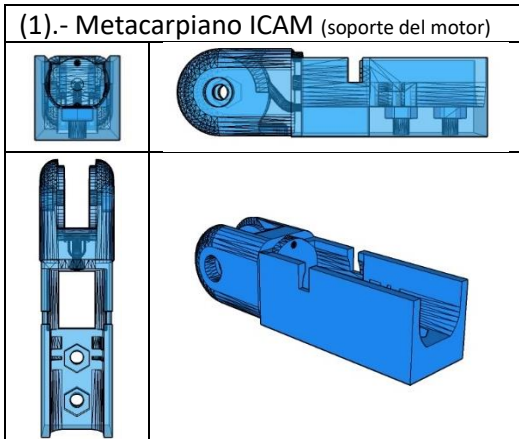
A continuación, se muestran las piezas impresas en tres dimensiones (Fig.35). Además de una lista donde se detallan los nombres de los archivos de dichas piezas y la cantidad de impresiones de cada pieza.

	<u>ref.</u>	<u>Elemento</u>	<u>Unid.</u>	
Impresas 3D	(1)	motor_holder.stl	4	Metacarpiano ICAM (soporte del motor)
	(2)	middle.stl	4	Falange medial ICAM
	(3)	proximal.stl	4	Falange proximal ICAM
	(4)	distal.stl	4	Falange distal ICAM
	(5)	motor_holder_thumb.stl	1	Metacarpiano pulgar (soporte del motor)
	(6)	proximal_thumb.stl	1	Falange proximal pulgar
	(7)	distal_thumb.stl	1	Falange distal pulgar
	(8)	spool.stl	5	Bobina
	(9)	abductor.stl	1	Abductor pulgar
	(10)	palm.stl	1	Palma de la mano
	(11)	dorsal.stl	1	Dorsal de la mano

*Nota: Con las siglas ICAM se hace referencia a los dedos: índice, corazón, anular y meñique.*

Tabla 6.- Detalles Piezas impresas 3D

Ref. Pieza	
Alzado	Perfil izquierdo
Planta	Vista general





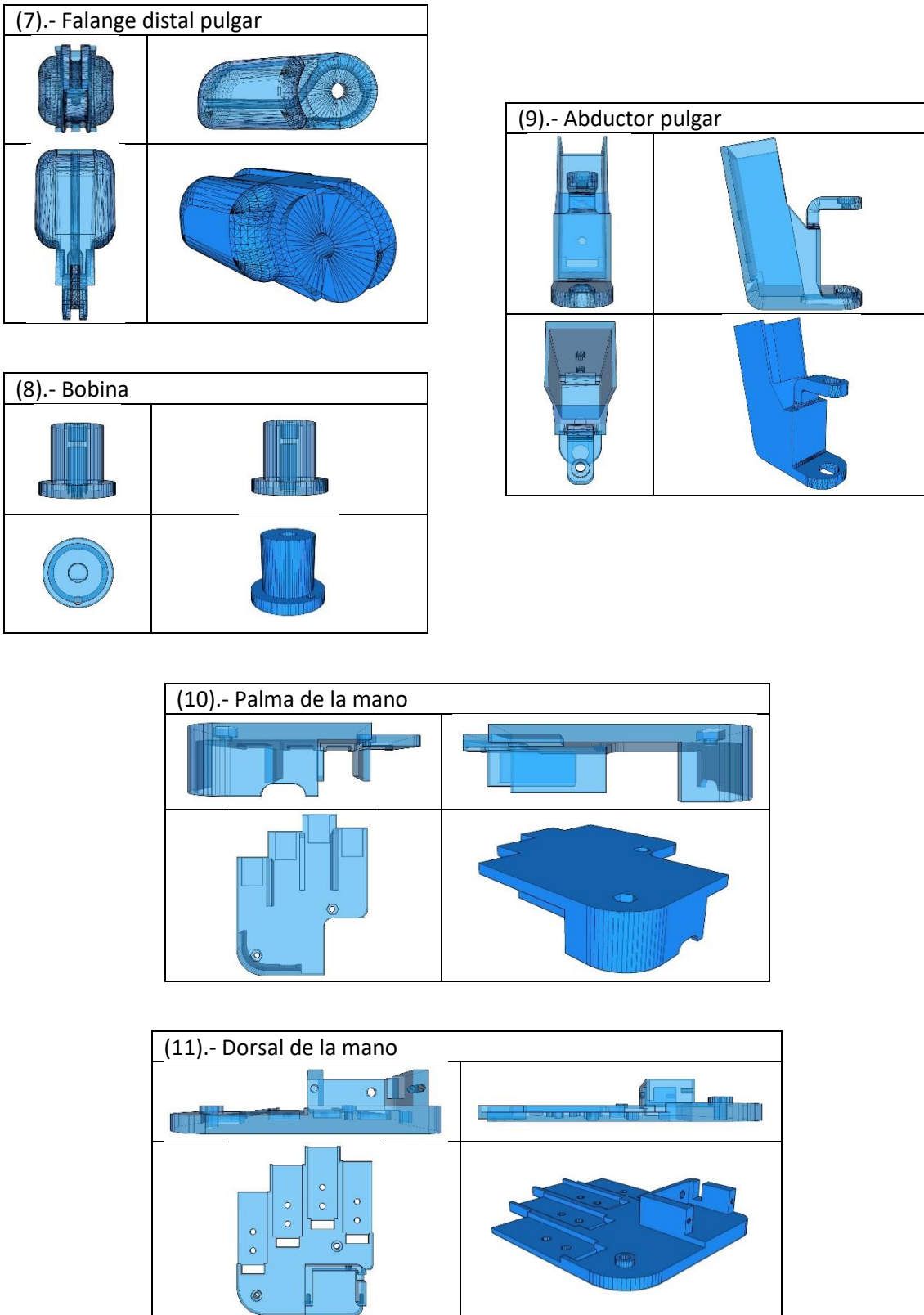


Fig. 35.- Vistas de las piezas



### 3.2.7.2 Motores y demás elementos electrónicos

	<u>Elemento</u>	<u>Unid.</u>	
<b>Motores y electrónica</b>	Motor con codificador	4	Angelelec DIY Sources Direct Current Motor, Metal Gear Reducer Motor With Encoder (380:1), with 9mm long d-shapes metal output shaft
	Microcontrolador	1	Arduino UNO

Tabla 7.- Resumen de componentes electrónicos

### 3.2.7.3 Otros elementos

	<u>Elemento</u>	<u>Unid.</u>	
<b>Otros</b>	cuerda	1	Bobina de hilo de pescar de 0,6mm de diam.
	tornillo grande	14	M3x14 tornillo
	tornillo pequeño	10	M3x8 tornillo
	tornillo mediano	2	M3x12 tornillo
	tuerca	26	M3 tuerca
	Gomitas	14	Elásticos de látex de 3,2mm de diam.
	Conectores	5	Bloques terminales de montaje en PCB con entrada de cable lateral

Tabla 8.- Resumen de otros componentes

## 4 Resultados experimentales

En este capítulo se explican las pruebas realizadas con los componentes del prototipo. Se han realizado cinco pruebas. La primera de ellas consiste en el testeo de todos los motores, prueba necesaria para la manipulación posterior de estos. Debido al problema que ha supuesto que no se pueda aprovechar la función del encoder con todos los dedos a la vez se ha trabajado la segunda y la tercera prueba utilizando los motores por separado. La cuarta prueba emplea un mecanismo de deducción de vueltas y sentido basado en que se conoce la señal de entrada, para poder así mover todos los dedos manteniendo la idea de realizar la labor de control de vueltas. Por último, se necesita un programa que se encargue de ajustar los dedos a la posición inicial.

### 4.1.1 Primera prueba: Testeo de los motores

La primera prueba realizada consiste en comprobar el correcto funcionamiento de los motores. Pese a comprar todos del mismo modelo, varían algunas de sus características entre ellos. Se dispone de cinco motores, dependiendo de los resultados obtenidos se ha asignado a cada dedo un motor. La *Fig.38* expone la mano abierta con los motores colocados y enumerados. En la *Tabla.9* de la página siguiente se muestran los sentidos de giro de ellos. La flecha indica el sentido del giro que realiza el motor si este es visto desde la bobina. En la tabla se indica, además a que dedo se ha asignado cada motor.

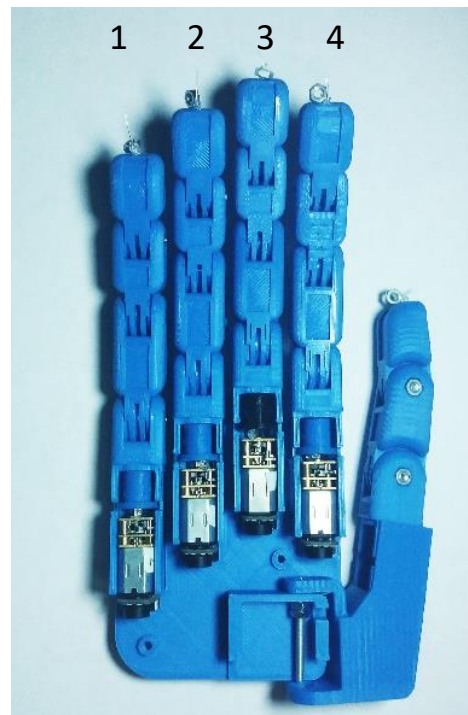


Fig. 36.- Dedos motorizados enumerados

Motor	1	2	3	4	5
POSITIVO	↻	↻	↺	↺	↺
NEGATIVO	↺	↺	↻	↻	↻
Dedo asignado	3	-	4	2	1

Tabla 9.- Relación sentido y giro de motores

El motor Nº 2 se ha excluido ya que gira más rápido que el resto de los motores, esto se debe a que dispone de un engranaje menos que los demás en el sistema de reducción de velocidad.

Para facilitar la programación es aconsejable que exista homogeneidad en la orden asignada respecto al movimiento obtenido para todos los dedos. Por ello, teniendo en cuenta los sentidos de giro, en el caso del dedo Nº 3 bastará con ajustar la cuerda del revés al resto de los dedos. Así se consigue que cuando se dé la orden de cerrar o abrir el dedo para todos los dedos implique el mismo movimiento del motor.

A partir de este punto cuando se refiera a los motores o a los dedos se utilizará la referencia del dedo correspondiente, salvo que se especifique.

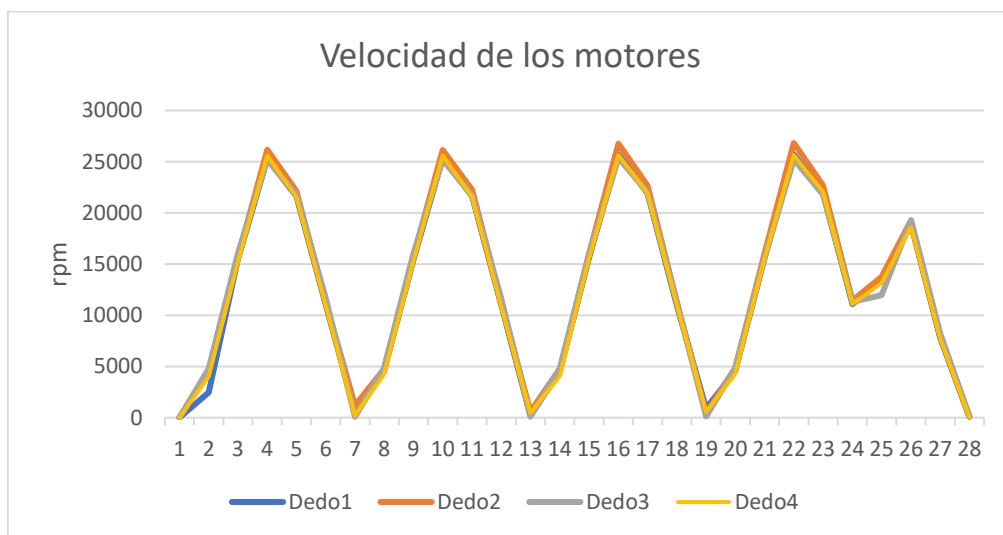
#### 4.1.2 Segunda prueba: Control con una señal del encoder

Para este apartado sólo se utiliza la información de fase de una salida del encoder. Es por esto por lo que la única información que se puede obtener de cada motor es la velocidad de giro, ignorando el sentido.

En el capítulo de anexos se encuentra la tabla con los resultados obtenidos en esta prueba. Para dichos resultados se han tomado para cada motor dos medidas en sentido positivo, dos medidas en sentido negativo y una medida de paro. Se puede observar que, en la primera toma de medida de todos los motores, cuando se inicializa el motor, este tarda más en coger más velocidad. Para las mediciones de positivo y negativo el movimiento el movimiento del motor se genera y se detiene de forma gradual, alcanzando la velocidad máxima. En el caso de la medida del movimiento de paro, se parte de un movimiento con aceleración directa y se para gradualmente.

Con la finalidad de estudiar gráficamente los resultados, en la *Fig.39 (página siguiente)* se ha representado una gráfica con los datos de velocidad de giro de los motores para cada toma de medida realizada. El comportamiento de todos los motores es casi idéntico. Por un lado, se puede observar, a la altura de la toma de datos nº24, que cuando la orden de movimiento se

ejecuta antes de que el motor haya terminado el movimiento anterior, el motor no llega a detenerse por completo. Esta es la razón de que, en la gráfica, en torno a esa medición no llegue a bajar la velocidad hasta cero, además de que en el último pico se aplique una aceleración instantánea. Observar que a la hora de programar un movimiento que empiece desde una velocidad mayor que cero, igualmente el motor tiene que realizar un breve periodo de aceleración (tomas de medida 24-26). Pese a que los dos primeros picos corresponden a un movimiento positivo y los dos siguientes a negativo, el resultado es el mismo. Esto se debe a que, como ya se ha explicado con anterioridad, los polos de los motores DC son invertibles. Además, hay que recordar que el dedo nº3 es inverso a los demás e igualmente mantiene el mismo comportamiento. Si se estuviera realizando el control con dos señales del encoder, entonces si se apreciarían las diferencias entre aplicar un movimiento positivo o negativo, cómo se verá en la siguiente prueba.



*Fig. 37.- Gráfica resumen de la prueba*

Como ya se ha comentado con anterioridad, se observa que el comportamiento de velocidad es similar en todos los motores, por lo tanto, en el siguiente punto se estudia un solo motor, aunque se haya hecho la prueba con todos.

#### **4.1.3 Tercera prueba: Control con dos señales del encoder**

Para esta prueba se han tenido en cuenta las dos salidas del encoder, obteniendo de esta manera información también del sentido de giro. Además, en este punto ya se tiene en cuenta la cantidad de giro correspondiente a la bobina.

El motor se ha hecho girar de manera gradual hasta alcanzar la máxima velocidad, que no es la velocidad máxima del motor, sino que es la velocidad a la que se va a hacer girar el motor para el movimiento de los dedos. Una vez alcanzada esta velocidad, el motor desciende de velocidad de forma gradual. Para el cálculo de vueltas de la bobina, se puede observar que los valores decimales que Arduino soporta no dan mucha resolución, no permitiendo la precisión deseada para este tipo de medición. Aún y todo se ha trabajado proporcionalmente en valores mayores, y a la hora de reflejar el resultado del número de vueltas que da la bobina se invierte la proporcionalidad. Consiguiendo de esta manera evitar la pérdida de información respecto a la cantidad de vueltas que da la bobina. Aún y todo, cuando el giro es más lento, y la cantidad de vuelta es del orden de las centésimas, el programa muestra que el giro es de cero.

En la primera toma de datos adjuntada en el apartado de resultados se observa que en la mayoría de las tomas de datos el número de pulsos obtenidos en el canal A es superior en uno o dos, a los obtenidos en el canal B. Lo que significa que el sentido de giro está siguiendo la secuencia: 10 11 01 00. Esto significa que el motor está girando en sentido negativo (ver Fig.40). Hay que tener en cuenta que para este resultado se ha utilizado el motor que funcionaba en sentido contrario a los demás, por ello se interpreta cómo movimiento negativo cuando el dedo estaría generando un movimiento positivo.

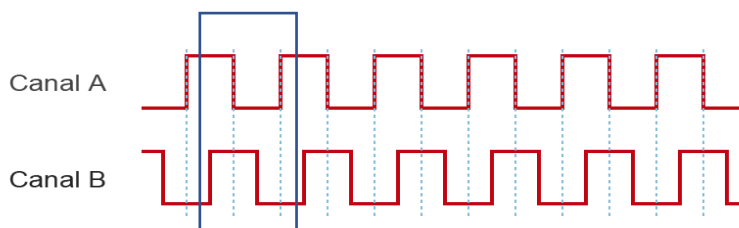


Fig. 38.- Señal obtenida del motor 1 (dedo 3)

En el caso del movimiento definido para los dedos cómo movimiento negativo, se hace la deducción inversa a la anterior. Contando en la mayoría de las mediciones más pulsos en canal B que en el canal A.

#### 4.1.4 Cuarta prueba: Control de los dedos

En este apartado se refleja el problema que se comentaba en apartados anteriores de que Arduino no permite implementar la función necesaria para recoger los pulsos del encoder uno por uno en todos los pines. Es por esto que se ha ideado un sistema que calcula el número de vueltas a partir de un experimento previo donde se define la velocidad a la que el motor va

a girar y en función a esto se hace el cálculo de cuantas vueltas ha dado. Para aprovechar la disponibilidad de los encoder se trabaja de manera sincronizada contando los pulsos de cada encoder.

La diferencia con el método ideal es que en el método ideal los puertos de entrada de los canales del codificador se mantienen a la escucha durante todo el funcionamiento, recogiendo el número total de pulsos sucedidos durante todo el funcionamiento. Mientras que, con el método experimental, se dedica un tiempo específico para contar los pulsos de cada motor. Después, con los datos obtenidos en el experimento se calcula cuantas vueltas ha dado cada motor y se muestran por pantalla, al igual que en los apartados anteriores.

Con este programa todos los dedos hacen el movimiento de flexión, definido como movimiento negativo y el de extensión, definido como movimiento positivo. Una vez se ejecuta el programa se puede pedir por teclado que la mano se cierre o se abra. Cuando los movimientos de realizan repetidas veces, suele dar lugar a que la posición de los dedos se desajuste un poco. Esto se debe a que el sistema de cuerdas no es del todo preciso, y los mismos motores, como se comenta en las primeras pruebas, no reaccionan igual a la misma orden una vez acaba de ser inicializado el programa o cuando ya se lleva un rato trabajando con el programa. Para solucionar este problema se ha realizado un último programa que sirve para reajustar la posición de cada dedo individualmente.

En los resultados se observa que los cuatro motores tienen el mismo comportamiento, lo que tiene sentido, ya que los cuatro motores tienen también las mismas características y están realizando el mismo movimiento. En el fragmento de los resultados sacado a continuación se observa el resumen de los datos obtenidos del movimiento de apertura de la mano:

.....RESUMEN.....						
Seconds	SENSOR	SENSOR	SPOOL	SPOOL	MOTOR	
	Pulses	Vueltas	Vueltas	RPM		
1-16	125.00	503.50	1.33	50.88		STOPED
2-16	125.00	503.50	1.33	50.88		STOPED
3-16	125.00	503.50	1.33	50.88		STOPED
4-17	125.00	503.50	1.33	50.88		STOPED

*Fig. 39.- Fragmento de resultado*

Por lo tanto, en el movimiento de apertura de cada dedo Arduino es capaz de registrar 125 pulsos, al no poder mantenerse el puerto en escucha y tener que tomar valores síncronamente. La bobina realiza 1.33 vueltas para realizar un movimiento completo.

#### 4.1.5 Quinta prueba: Ajuste de posición de los dedos

Además, ha sido necesaria la creación de un programa capaz de mover cada dedo individualmente para poder reajustar todos los dedos cuando estos se desajustan por alguna razón.

Este programa funciona introduciendo por teclado la orden correspondiente al dedo y al sentido en el que se quiere mover. La tabla siguiente muestra el comando que hay que introducir para cada movimiento.

Dedo	1	2	3	4
Extensión	1	2	3	5
Reflexión	5	6	7	8

Tabla 10.- Instrucciones de giro

El programa acepta que se introduzcan de una vez todos los movimientos que se quieran realizar, y una vez pulsado “enviar” se ejecutaran en orden todos los comandos. Por ejemplo, si se quiere abrir mediante dos impulsos el segundo dedo y cerrar mediante tres impulsos el cuarto, habría que introducir en el monitor serie “22888” y pulsar el botón de enviar.

## 5 CONCLUSIONES

### 5.1 Metodología de diseño

En este trabajo se han estudiado los diferentes sistemas necesarios para la realización de una mano artificial con capacidad de movimiento. A la hora de escoger dentro de los diferentes sistemas de control, actuación y transmisión, es muy importante tener en cuenta que tipo de uso se le va a dar a la mano.

El diseño del prototipo de este trabajo tiene como finalidad realizar la experiencia de crear un modelo donde se han tenido en cuenta los tres sistemas mencionados. Se han podido experimentar las ventajas y desventajas de la solución escogida, a la par que las características a tener en cuenta para cada sistema, y la compatibilidad entre los sistemas.

El hecho de haber realizado el diseño mediante impresión 3D ha resultado en mayor rapidez a la hora de modificar las piezas. Teniendo en cuenta las veces que ha sido necesario modificarlas hasta que encajaran correctamente, si se hubiera utilizado otro tipo de manufacturación el haber realizado tantos cambios habría necesitado de más tiempo aún.

En el diseño del sistema se ha premiado la disponibilidad y bajo precio de los componentes para tener una accesible mano artificial y de código libre para la experimentación. Sin embargo, esto trae como consecuencia que la robustez del prototipo y prestaciones se vean afectados acordeamente.

Siguiendo con el diseño los dedos se mueven con un mecanismo de cuerdas que se recogen en una bobina. Para insertar la bobina en el motor hace falta hacer gran fuerza, teniendo cuidado de no estropear este último. Pero esto es necesario para que una vez encaje la bobina en el motor, sea seguro que no se vaya a desajustar. Por otro lado, en ocasiones la cuerda que atraviesa el hilo se atasca entre la bobina y la pared de la pieza que sujeta al motor. Siendo más práctico utilizar el prototipo con la palma sin colocar para poder solventar este problema antes de que se llegue a atascar e implique tener que volver a colocar todo desde el principio.



El sistema de actuación carece también de total precisión, lo que simplemente contribuye a los desajustes mencionados en el párrafo anterior. Este desajuste no resulta un gran inconveniente, hay que tenerlo en cuenta y reajustar el sistema cuando se estima necesario.

## 5.2 Ventajas/Desventajas

Las ventajas de haber utilizado la impresión 3D son el coste que esto conlleva y la rapidez de creación de las piezas. Además, el hecho de que el diseño no partiera de cero, sino que fuera a partir de un proyecto ajeno, agiliza el diseño a la hora de modificar las piezas para ajustarlas a los componentes escogidos para el proyecto. Usando SketchUp.

El sistema de transmisión tiene el inconveniente de que al ser realizado con cuerdas da lugar en algunos escenarios a desajustes, teniendo que reajustar periódicamente la apertura de cada dedo. Además, las gomas encargadas de asegurar el movimiento de extensión de los dedos se desgastan al tiempo. Resumiendo, este sistema de transmisión necesita de un mantenimiento más continuo en el tiempo en comparación a otros. Este mantenimiento no resulta tan costoso como incómodo. Aunque este sea el precio de la sencillez que conlleva el diseño del mismo.

En cuanto al sistema de control, no se han podido aprovechar al máximo las posibilidades que brindaba el encoder. No por ello se ha dejado de trabajar con el encoder y se ha podido comprobar que lo estudiado teóricamente sobre su funcionamiento se ajusta a lo experimentado. La principal ventaja que presenta el encoder es la capacidad de deducción del sentido y velocidad de giro, pese a que en este proyecto esos datos sean de por sí datos de entrada. La desventaja de la utilización del encoder es la necesidad de utilizar una placa microrcontroladora con mayores prestaciones que la empleada.

El sistema de control se encuentra limitado al no poder aprovechar las salidas del encoder de todos los dedos. Tampoco resulta un gran inconveniente ya que el prototipo no pretende ser funcional, sino ser una herramienta de experimentación. Además de que las funcionalidades que ofrece el encoder se han estudiado igualmente, aunque sólo haya sido posible implementarlas por completo en un dedo.

En general, el prototipo presenta las ventajas de que es sencillo de montar, el lenguaje de programación no es complejo y los movimientos se realizan correctamente. En cuanto a las desventajas, las prestaciones de Arduino UNO son limitadas, no se pueden aprovechar todas las

funcionalidades del encoder y las piezas necesitan de la labor de mantenimiento con bastante frecuencia.

### 5.3 Contextualización con la vida real

Como ya se ha comentado con anterioridad este trabajo está enfocado a las manos artificiales. Se ha visto la similitud que cada vez está más presente entre las prótesis de mano y las manos robóticas.

Por otro lado, si se pretendiera utilizar este prototipo en la vida real como prótesis, no sería la solución más acertada. Aún y realizándole los ajustes necesarios para que la prótesis pudiera recibir las señales de control mediante mioléctrica, esta no sería una solución apropiada para ese tipo de aplicación, ya que no es lo suficientemente resistente. Se necesitaría con demasiada frecuencia realizar labores de mantenimiento, el material de impresión 3D no es lo suficientemente resistente y los componentes como la cuerda y las gomas son muy delicadas como para un uso continuo. Entonces también habría que cambiar el sistema de transmisión, y finalmente, la prótesis no tendría nada que ver con el prototipo inicial.

Si se enfoca este prototipo como una mano robótica, sería aconsejable aplicarle unos puntos de mejora explicados más adelante. Aunque ya como está puede entenderse que es una mano robótica, sería interesante profundizar más en la idea.

### 5.4 Puntos de mejora

Lo primero de todo sería beneficioso sustituir Arduino UNO por una placa microcontroladora con más recursos, como bien podría ser Arduino MEGA. De esta manera se podrían aprovechar con mejores resultados las funcionalidades que los codificadores aportan.

También sería acorde añadir movimiento al dedo pulgar, añadiéndole el servomotor y otro motor más. Para ello haría falta primero modificar la pieza que lo contiene.

Además, se pueden añadir detección de eventos que produzcan un cambio de comportamiento en el prototipo. Por ejemplo, en el diseño actual si la mano se está cerrando y encuentra un obstáculo, los motores siguen intentando moverse hasta finalizar el movimiento que se ha comenzado, aunque no pueda seguir moviéndose los motores siguen intentándolo. Con esta funcionalidad se podría encaminar el proyecto hacia el agarre de objetos.

Otra posibilidad sería añadir a los dedos un sensor que detectase la posición de estos. Esta práctica sería una mejora en cuanto a que cuando los dedos terminan de hacer el movimiento de flexión y extensión, muchas veces la cuerda se desajusta. Si se conociera la posición de los dedos, el reajuste de estos podría hacerse automáticamente.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Reseña hitórica de las prótesis.” [Online]. Available:  
<http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/art01-1a.htm>.
- [2] O. O. Francisco Javier, “Bioingeiería - Prótesis biónicas para manos.” [Online]. Available:  
<http://www.monografias.com/trabajos96/bioingenieria-protesis-bionicas-manos/bioingenieria-protesis-bionicas-manos.shtml>.
- [3] S. G. Bruno, A. de la E. Javier, and P. G. Antonio, “Diseño mecánico de prótesis de mano multidedo antropomórfica infractuada,” 2015.
- [4] diariodicen.es, “La autonomía de las prótesis ya es un hecho.” [Online]. Available:  
<https://www.diariodicen.es/201705/la-autonomia-de-las-protesis-ya-es-un-hecho/>.
- [5] D. M. Mar, “Una prótesis de mano que ‘ve’ y se mueve por sí misma,” 2017. [Online]. Available: <http://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/salud/2017/05/03/5909f25ae2704eec588b467d.html>.
- [6] H. P. Saal, B. P. Delhay, B. C. Rayhaun, and S. J. Bensmaia, “Simulating tactile signals from the whole hand with millisecond precision,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, p. 201704856, 2017.
- [7] M3dmadrid, “Tipos de prótesis.” [Online]. Available:  
<http://www.m3dmadrid.com/proyectos/protesis-3d/protesis-mio-electrica/tipos-de-protesis/>.
- [8] P. D. E. Mano, “MECANISMOS DE TRANSMISIÓN Y ACTUADORES UTILIZADOS EN P á g i n a | 335 P á g i n a | 336,” pp. 335–345, 2009.
- [9] S. Susana, “Descubriendo los plásticos de la impresión 3D.”
- [10] F. Joseph, “ABS Vs PLA Shootout.” [Online]. Available: <http://3dinsider.com/abs-vs-pla-shootout/>.

- [11] L. Nick, "3D Printing Filament Guide 2017: ABS vs PLA vs many materials." [Online]. Available: <http://nicklievendag.com/filament-guide/>.
- [12] "Thingiverse." [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/>.
- [13] "CONTROL VELOCIDAD Y SENTIDO DE MOTOR DC." [Online]. Available: <http://diymakers.es/control-velocidad-y-sentido-de-motor-dc/>.
- [14] Dicyt, "Un material 'con memoria' para la industria médica." [Online]. Available: <http://www.dicyt.com/viewNews.php?newsId=29194>.
- [15] "Cilindros neumáticos Numatics." [Online]. Available: <http://www.cilindros-neumaticos-numatics.com/>.
- [16] Festo, "Airic's\_arm." [Online]. Available: <https://www.festo.com/group/es/cms/10247.htm>.
- [17] Festo, "Airic's arm New opportunities in mechatronics and bionics," 2007.
- [18] "Cilindros hidráulicos y neumáticos. Actuadores." [Online]. Available: [http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica\\_hidraulica22.htm](http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm).
- [19] A. H. Rubio, "RESORTES : A FLEXIÓN Y A TORSIÓN."
- [20] "Universitarios desarrollan dedo protésico capaz de generar fuerza y movimiento," 2015. [Online]. Available: [http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015\\_485.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015_485.html).
- [21] "Una prótesis que se controla con la mente permite mover los dedos por separado." [Online]. Available: [http://www.tendencias21.net/Una-protesis-que-se-controla-con-la-mente-permite-mover-los-dedos-por-separado\\_a42031.html](http://www.tendencias21.net/Una-protesis-que-se-controla-con-la-mente-permite-mover-los-dedos-por-separado_a42031.html).
- [22] "Dextra, una mano robótica impresa en 3D." [Online]. Available: <https://descubrearduino.com/dextra-una-mano-robotica-impresa-3d/>.
- [23] A. Villoslada, "DEXTRA: Open-source myoelectric hand prosthesis." [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/9890-dextra>.
- [24] Alvaro Villoslada (Alvipe), "Dextra." [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1538508>.
- [25] "Diferencia Entre un Conector USB Tipo A y un Conector Tipo B." [Online]. Available: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/5EC79A373FA6F19786257D9E0055D93F>.

- [26] “ARDUINO UNO REV3.” [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>.
- [27] “Motores.” [Online]. Available:  
<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/arduino-motor-shield/>.
- [28] del V. H. Luis, “I2C cómo conectar dos Arduino mediante este protocolo.”
- [29] del V. H. Luis, “Adafruit Motor Shield, controlando motores con Arduino.” [Online]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/adafruit-motor-shield-arduino/>.
- [30] “Adafruit Motor / Stepper / Servo Shield para Arduino v2 Kit - v2.3.” [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/1438>.
- [31] “Efecto Hall.” [Online]. Available: [https://www.ecured.cu/Efecto\\_Hall](https://www.ecured.cu/Efecto_Hall).
- [32] J. Manuel Dorador González, P. Ríos Murillo, I. Flores Luna, and A. Juárez Mendoza, “Robótica Y Prótesis Inteligentes,” *Rev. Digit. Univ. Número*, vol. 18, no. 1, pp. 1067–6079, 2004.
- [33] J. M. H. Hernández, “Motor DC.” [Online]. Available: <https://www.tecnologiarobotica.com/robotica/motor-dc/>.
- [34] “70.501 MICRO MOTOR PLANO DE 1.5 A 3V DC.” [Online]. Available: <http://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idIdioma=&idTienda=93&codProducto=999019389&cPath=1193>.
- [35] G. G. Antony, “¿Qué es y cómo funciona un servomotor?” [Online]. Available: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>.
- [36] A. Agustín, “Materiales con memoria de forma, el Nitinol.” [Online]. Available: [https://www.seas.es/blog/disenio\\_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/](https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/).
- [37] A. Mahiques, “Muñeca y mano.” [Online]. Available: <http://www.cto-am.com/mano.htm>.

## 7 ANEXOS

### 7.1 Resultados

#### 7.1.1 Testeo de los motores

##### MOTOR 1 – Led azul

```

Adafruit Motorshield V2 - Test Motor DC!
-----
INSTRUCCIONES:
  Para mover el motor en sentido positivo escriba: +
  Para mover el motor en sentido negativo escriba: -
  Para mover parar el motor escriba: S
-----

..Datos tomados por el Encoder: .....
      MOTOR      MOTOR      WHEEL
Seconds  Pulses    RPM      RPM
-----
+++ SENTIDO POSITIVO +++
9         0         0         0.0
10        639        4783        12.6
11       2137        16011        42.1
Velocidad alcanzada!
12        3383        25196        66.3
13        2910        21803        57.4
14        1554        11632        30.6
+++ SENTIDO POSITIVO +++
31         190         82         0.2
32         650        4870        12.8
33        2145        16055        42.3
Velocidad alcanzada!
34        3384        25204        66.3
35        2897        21684        57.1
36        1550        11613        30.6
--- SENTIDO NEGATIVO ---
51         191         96         0.3
52         642        4805        12.6
53        2122        15899        41.8
Velocidad alcanzada!
54        3407        25375        66.8
55        2938        22013        57.9
56        1514        11332        29.8
--- SENTIDO NEGATIVO ---
68         190         125         0.3
69         644        4825        12.7
70        2099        15711        41.3
Velocidad alcanzada!
71        3385        25211        66.3
72        2911        21789        57.3
73        1509        11306        29.8
+++ SENTIDO POSITIVO +++
117        189         32         0.1
118        650        4865        12.8
119       2128        15928        41.9
Velocidad alcanzada!
120       3476        25889        68.1
121       2984        22358        58.8
122       1539        11519        30.3
...PARO123      1595      11951      31.4
124       2572        19271        50.7
125       1102        8249         21.7
127        37         125         0.3

```

SENTIDOS DE GIRO:    ⤵ +    - ⤴

## MOTOR 2 – Led verde

Adafruit Motorshield V2 - Test Motor DC!				
-----				
INSTRUCCIONES:				
Para mover el motor en sentido positivo escriba: +				
Para mover el motor en sentido negativo escriba: -				
Para mover parar el motor escriba: S				
-----				
..Datos tomados por el Encoder: .....				
	MOTOR	MOTOR	WHEEL	
Seconds	Pulses	RPM	RPM	
.....				
+++ SENTIDO POSITIVO +++				
2	0	0	0.0	
3	634	4750	12.5	
4	2066	15495	40.8	
Velocidad alcanzada!				
5	3344	24906	65.5	
6	2855	21391	56.3	
7	1491	11160	29.4	
+++ SENTIDO POSITIVO +++				
10	188	420	1.1	
11	631	4728	12.4	
12	2071	15517	40.8	
Velocidad alcanzada!				
13	3340	24876	65.5	
14	2859	21421	56.4	
15	1513	11325	29.8	
--- SENTIDO NEGATIVO ---				
19	189	383	1.0	
20	627	4693	12.4	
21	2105	15772	41.5	
Velocidad alcanzada!				
22	3463	25792	67.9	
23	2960	22178	58.4	
24	1527	11430	30.1	
--- SENTIDO NEGATIVO ---				
25	190	1180	3.1	
26	633	4738	12.5	
27	2102	15749	41.4	
Velocidad alcanzada!				
28	3339	24844	65.4	
29	2879	21571	56.8	
30	1520	11377	29.9	
+++ SENTIDO POSITIVO +++				
33	191	468	1.2	
34	639	4788	12.6	
35	2098	15719	41.4	
Velocidad alcanzada!				
36	3374	25129	66.1	
37	2902	21743	57.2	
38	1528	11437	30.1	
...PARO39	1774	13292	35.0	
40	2525	18900	49.7	
41	1085	8129	21.4	
43	34	115	0.3	

Nota: este motor gira más rápido que los demás, por falta de una engranaje.

SENTIDOS DE GIRO: ⤵ + - ⤴



## MOTOR 3 – Led verde

Adafruit Motorshield V2 - Test Motor DC!				
-----				
INSTRUCCIONES:				
Para mover el motor en sentido positivo escriba: +				
Para mover el motor en sentido negativo escriba: -				
Para mover parar el motor escriba: S				
-----				
..Datos tomados por el Encoder: .....				
	MOTOR	MOTOR	WHEEL	
Seconds	Pulses	RPM	RPM	
.....				
+++ SENTIDO POSITIVO +++				
1	0	0	0.0	
2	536	4016	10.6	
3	2020	15120	39.8	
Velocidad alcanzada!				
4	3435	25609	67.4	
5	2875	21519	56.6	
6	1450	10864	28.6	
+++ SENTIDO POSITIVO +++				
12	153	207	0.5	
13	567	4248	11.2	
14	2040	15285	40.2	
Velocidad alcanzada!				
15	3435	25583	67.3	
16	2880	21578	56.8	
17	1444	10808	28.4	
--- SENTIDO NEGATIVO ---				
19	155	471	1.2	
20	543	4064	10.7	
21	2064	15465	40.7	
Velocidad alcanzada!				
22	3447	25647	67.5	
23	2928	21916	57.7	
24	1480	11089	29.2	
--- SENTIDO NEGATIVO ---				
27	174	541	1.4	
28	571	4283	11.3	
29	2075	15547	40.9	
Velocidad alcanzada!				
30	3444	25650	67.5	
31	2947	22058	58.0	
32	1479	11081	29.2	
+++ SENTIDO POSITIVO +++				
39	175	189	0.5	
40	501	3754	9.9	
41	2024	15165	39.9	
Velocidad alcanzada!				
42	3420	25472	67.0	
43	2894	21662	57.0	
44	1455	10902	28.7	
...PARO45	1756	13157	34.6	
46	2480	18581	48.9	
47	1028	7702	20.3	
49	19	64	0.2	

SENTIDOS DE GIRO:    ↺ +    - ↻

## MOTOR 4 – Led verde

```

Adafruit Motorshield V2 - Test Motor DC!
-----
INSTRUCCIONES:
    Para mover el motor en sentido positivo escriba: +
    Para mover el motor en sentido negativo escriba: -
    Para mover parar el motor escriba: S
-----
..Datos tomados por el Encoder: .....
      MOTOR      MOTOR      WHEEL
Seconds  Pulses    RPM      RPM
.....
+++ SENTIDO POSITIVO +++
3         1         2         0.0
4         619       4633      12.2
5         2088      15644     41.2
Velocidad alcanzada!
6         3514      26172     68.9
7         2954      22133     58.2
8         1498      11213     29.5
+++ SENTIDO POSITIVO +++
9         183       1178      3.1
10        634       4746     12.5
11        2105      15772     41.5
Velocidad alcanzada!
12        3509      26135     68.8
13        2971      22260     58.6
14        1503      11250     29.6
--- SENTIDO NEGATIVO ---
17        186       574       1.5
18        636       4765     12.5
19        2135      15981     42.1
Velocidad alcanzada!
20        3587      26742     70.4
21        3028      22665     59.6
22        1515      11351     29.9
--- SENTIDO NEGATIVO ---
25        187       429       1.1
26        649       4863     12.8
27        2150      16093     42.3
Velocidad alcanzada!
28        3597      26817     70.6
29        3033      22702     59.7
30        1526      11434     30.1
+++ SENTIDO POSITIVO +++
32        189       662       1.7
33        633       4738     12.5
34        2113      15832     41.7
Velocidad alcanzada!
35        3508      26127     68.8
36        2993      22425     59.0
37        1497      11205     29.5
...PARO38        1834      13741     36.2
39        2570      19237     50.6
40        1069      8009      21.1
43        33        111       0.3

```

SENTIDOS DE GIRO:    ⤴ +    - ⤵

## MOTOR 5 – Led verde

```

Adafruit Motorshield V2 - Test Motor DC!
-----
INSTRUCCIONES:
    Para mover el motor en sentido positivo escriba: +
    Para mover el motor en sentido negativo escriba: -
    Para mover parar el motor escriba: S
-----

..Datos tomados por el Encoder: .....
      MOTOR      MOTOR      WHEEL
Seconds  Pulses    RPM      RPM
.....
+++ SENTIDO POSITIVO +++
2         1         4         0.0
3         326       2443       6.4
4         2059      15427      40.6
Velocidad alcanzada!
5         3393      25271      66.5
6         2886      21623      56.9
7         1468      10999      28.9
+++ SENTIDO POSITIVO +++
9         173       559        1.5
10        612       4585       12.1
11        2065      15457      40.7
Velocidad alcanzada!
12        3406      25342      66.7
13        2885      21616      56.9
14        1466      10984      28.9
--- SENTIDO NEGATIVO ---
21        171       193        0.5
22        603       4518       11.9
23        2084      15599      41.0
Velocidad alcanzada!
24        3444      25676      67.6
25        2928      21916      57.7
26        1473      11036      29.0
--- SENTIDO NEGATIVO ---
27        168       906        2.4
28        607       4548       12.0
29        2090      15644      41.2
Velocidad alcanzada!
30        3447      25698      67.6
31        2937      21984      57.9
32        1481      11096      29.2
+++ SENTIDO POSITIVO +++
38        169       214        0.6
39        605       4528       11.9
40        2065      15472      40.7
Velocidad alcanzada!
41        3432      25561      67.3
42        2920      21878      57.6
43        1465      10966      28.9
...PARO44        1793      13434      35.4
45        2522      18877      49.7
46        1040      7792       20.5
48        28        94         0.2

```

SENTIDOS DE GIRO:    ↺ +    - ↻

### 7.1.2 Control con una señal del encoder

DEDO 1 (MOTOR5)			DEDO 2 (MOTOR4)			DEDO 3 (MOTOR1)			DEDO 4 (MOTOR3)		
MOTOR	MOTOR	WHEEL	MOTOR	MOTOR	WHEEL	MOTOR	MOTOR	WHEEL	MOTOR	MOTOR	WHEEL
pulses	rpm	rpm	pulses	rpm	rpm	pulses	rpm	rpm	pulses	rpm	rpm
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1	4	0,0	1	2	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
326	2443	6,4	619	4633	12,2	639	4783	12,6	536	4016	10,6
2059	15427	40,6	2088	15644	41,2	2137	16011	42,1	2020	15120	39,8
3393	25271	66,5	3514	26172	68,9	3383	25196	66,3	3435	25609	67,4
2886	21623	56,9	2954	22133	58,2	2910	21803	57,4	2875	21519	56,6
1468	10999	28,9	1498	11213	29,5	1554	11632	30,6	1450	10864	28,6
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
173	559	1,5	183	1178	3,1	190	82	0,2	153	207	0,5
612	4585	12,1	634	4746	12,5	642	4870	12,8	567	4248	11,2
2065	15457	40,7	2105	15772	41,5	2122	16055	42,3	2040	15285	40,2
3406	25342	66,7	3509	26135	68,8	3384	25204	66,3	3435	25583	67,3
2885	21616	56,9	2971	22260	58,6	2897	21684	57,1	2880	21578	56,8
1466	10984	28,9	1503	11250	29,6	1550	11613	30,6	1444	10808	28,4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
171	193	0,5	186	574	1,5	191	96	3,0	155	471	1,2
603	4518	11,9	636	4765	12,5	642	4805	12,6	543	4064	10,7
2084	15599	41,0	2135	15981	42,1	2122	15899	41,8	2064	15465	40,7
3444	25676	67,6	3587	26742	70,4	3407	25375	66,8	3447	25647	67,5
2928	21916	57,7	3028	22665	59,6	2938	22013	57,9	2928	21916	57,7
1473	11036	29,0	1515	11351	29,9	1514	11332	29,8	1480	11089	29,2
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
168	906	2,4	187	429	1,1	190	125	0,3	174	541	1,4
607	4548	12,0	649	4863	12,8	644	4825	12,7	571	4283	11,3
2090	15644	41,2	2150	16093	42,3	2099	15711	41,3	2075	15547	40,9
3447	25698	67,6	3597	26817	70,6	3385	25211	66,3	3444	25650	67,5
2937	21984	57,9	3033	22702	59,7	2911	21789	57,3	2947	22058	58,0
1481	11096	29,2	1526	11434	30,1	1509	11306	29,8	1479	11081	29,2
STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP	STOP
1793	13434	35,4	1834	13741	36,2	1595	11951	31,4	1756	13157	34,6
2522	18877	49,7	2570	19237	50,6	2572	19271	50,7	2480	18581	48,9
1040	7792	20,5	1069	8009	21,1	1102	8249	21,7	1028	7702	20,3
28	94	0,2	33	111	0,3	37	125	0,3	19	64	0,2

### 7.1.3 Control con dos señales del encoder

Adafruit Motorshield V2 - Test Motor DC!							
INSTRUCCIONES:							
Para mover el motor en sentido positivo escriba: +							
Para mover el motor en sentido negativo escriba: -							
Para mover parar el motor escriba: S							
..Datos tomados por el Encoder: .....							
Seconds	SENSOR A Pulses	SENSOR B Pulses	SENSOR A RPM	SENSOR B RPM	WHEEL RPM	WHEEL RPM	
+++ SENTIDO POSITIVO +++							
9	0	0	0	0	0.0	0.0	
10	0	0	0	0	0.0	0.0	
11	0	0	0	0	0.0	0.0	
12	0	0	0	0	0.0	0.0	
13	0	0	0	0	0.0	0.0	
14	0	0	0	0	0.0	0.0	
15	0	0	0	0	0.0	0.0	
16	0	0	0	0	0.0	0.0	
17	0	0	0	0	0.0	0.0	
18	2	2	15	15	0.0	0.0	
19	5	4	37	30	0.1	0.1	
20	4	5	30	37	0.1	0.1	
21	8	7	60	52	0.2	0.1	
22	8	10	60	74	0.2	0.2	
23	10	12	74	89	0.2	0.2	
24	10	12	74	89	0.2	0.2	
25	8	7	60	52	0.2	0.1	
26	2	4	15	30	0.0	0.1	
27	13	14	97	104	0.3	0.3	
28	17	19	127	142	0.3	0.4	
29	12	14	89	104	0.2	0.3	
30	5	8	37	60	0.1	0.2	
31	4	5	30	37	0.1	0.1	
32	8	12	60	89	0.2	0.2	
33	2	2	15	15	0.0	0.0	
34	2	2	15	15	0.0	0.0	
Velocidad alcanzada!							
35	4	7	30	52	0.1	0.1	
36	0	0	0	0	0.0	0.0	
37	2	6	15	45	0.0	0.1	
38	8	12	60	89	0.2	0.2	
39	8	10	60	74	0.2	0.2	
40	3	3	22	22	0.1	0.1	
41	3	5	22	37	0.1	0.1	
42	8	15	60	112	0.2	0.3	
43	9	10	67	74	0.2	0.2	
44	9	10	67	74	0.2	0.2	
45	0	0	0	0	0.0	0.0	
46	3	5	22	37	0.1	0.1	
47	6	8	45	60	0.1	0.2	
48	0	0	0	0	0.0	0.0	
49	1	1	7	7	0.0	0.0	
50	5	6	37	45	0.1	0.1	
51	1	1	7	7	0.0	0.0	
52	1	1	7	7	0.0	0.0	
53	0	0	0	0	0.0	0.0	
54	0	0	0	0	0.0	0.0	
55	0	0	0	0	0.0	0.0	
56	0	0	0	0	0.0	0.0	
57	0	0	0	0	0.0	0.0	
58	0	0	0	0	0.0	0.0	
59	0	0	0	0	0.0	0.0	
60	0	0	0	0	0.0	0.0	

## 7.1.4 Control de los dedos

```

Adafruit Motorshield V2 - Test Motor DC!
-----
INSTRUCCIONES:
    Para mover los motores en sentido positivo escriba: +
    Para mover los motores en sentido negativo escriba: -
    Para mover parar el motor escriba: S
-----
..Datos tomados por el Encoder: .....
    | SENSOR | SENSOR | SPOOL | SPOOL | MOTOR |
Seconds | Pulses | Vueltas | Vueltas | RPM |
-----
Iniciado.
--- SENTIDO NEGATIVO --- Movimiento de reflexion
4 | 1 | 4.03 | 0.01 | 0.64 | 1 |
4 | 1 | 4.03 | 0.01 | 0.64 | 2 |
4 | 1 | 4.03 | 0.01 | 0.64 | 3 |
4 | 1 | 4.03 | 0.01 | 0.64 | 4 |
- - - |
5 | 81 | 322.24 | 0.85 | 50.88 | 1 |
5 | 81 | 322.24 | 0.85 | 50.88 | 2 |
5 | 81 | 322.24 | 0.85 | 50.88 | 3 |
5 | 81 | 322.24 | 0.85 | 50.88 | 4 |
- - - |
Paro
6 | 126 | 181.26 | 0.48 | 28.62 | 1 |
6 | 126 | 181.26 | 0.48 | 28.62 | 2 |
6 | 126 | 181.26 | 0.48 | 28.62 | 3 |
6 | 126 | 181.26 | 0.48 | 28.62 | 4 |
- - - |
.....RESUMEN.....
    | SENSOR | SENSOR | SPOOL | SPOOL | MOTOR |
Seconds | Pulses | Vueltas | Vueltas | RPM |
1-7 | 125.00 | 503.50 | 1.33 | 50.88 | STOPED |
.....
2-7 | 125.00 | 503.50 | 1.33 | 50.88 | STOPED |
.....
3-7 | 125.00 | 503.50 | 1.33 | 50.88 | STOPED |
.....
4-7 | 125.00 | 503.50 | 1.33 | 50.88 | STOPED |
.....
Iniciado.
+++ SENTIDO POSITIVO +++ Movimiento de extension
13 | 1 | 4.03 | 0.01 | 0.64 | 1 |
13 | 1 | 4.03 | 0.01 | 0.64 | 2 |
13 | 1 | 4.03 | 0.01 | 0.64 | 3 |
13 | 1 | 4.03 | 0.01 | 0.64 | 4 |
+ + + |
14 | 81 | 322.24 | 0.85 | 50.88 | 1 |
14 | 81 | 322.24 | 0.85 | 50.88 | 2 |
14 | 81 | 322.24 | 0.85 | 50.88 | 3 |
14 | 81 | 322.24 | 0.85 | 50.88 | 4 |
+ + + |
Paro
16 | 126 | 181.26 | 0.48 | 28.62 | 1 |
16 | 126 | 181.26 | 0.48 | 28.62 | 2 |
16 | 126 | 181.26 | 0.48 | 28.62 | 3 |
16 | 126 | 181.26 | 0.48 | 28.62 | 4 |
+ + + |
.....RESUMEN.....
    | SENSOR | SENSOR | SPOOL | SPOOL | MOTOR |
Seconds | Pulses | Vueltas | Vueltas | RPM |
1-16 | 125.00 | 503.50 | 1.33 | 50.88 | STOPED |
.....
2-16 | 125.00 | 503.50 | 1.33 | 50.88 | STOPED |
.....
3-16 | 125.00 | 503.50 | 1.33 | 50.88 | STOPED |
.....
4-17 | 125.00 | 503.50 | 1.33 | 50.88 | STOPED |
.....
Iniciado.

```